

УДК 330.42, 330.46, 338.12

JEL C60

DOI: <http://doi.org/10.25728/econbull.2023.1.9-shaposhnikov>

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР¹

Шапошников Артем Михайлович

*Российская академия Народного Хозяйства при Президенте РФ,
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия,
e-mail: horen25@mail.ru; SPIN-код: 7451-6291, <https://orcid.org/0000-0003-3720-2725>*

Ратнер Светлана Валерьевна

*Институт проблем управления РАН,
Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия
e-mail: lanarat@ipu.ru; SPIN-код: 7840-4282; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>*

Аннотация. Анализ среды функционирования (в англоязычной терминологии – Data Envelopment Analysis, DEA) в последние несколько десятилетий является одним из самых быстроразвивающихся подходов к решению управленческих задач по многокритериальной оценке эффективности однородных экономических агентов. Только за последний год было опубликовано более 1800 новых статей по анализу среды функционирования, в которых все более активно развиваются гибридные, многоэтапные и сетевые модели DEA. Поэтому целью настоящего обзорного исследования является анализ, систематизация и идентификация общих трендов развития моделей DEA, их практических приложений за 2017–2021 гг., а также наиболее актуальных проблем в развитии методологии.

Ключевые слова: *Data envelopment analysis*, эффективность, производительность, многокритериальная оценка, сетевые модели, многоэтапные модели

EVOLUTION OF DATA ENVELOPMENT ANALYSIS: LITERATURE REVIEW

Shaposhnikov Artem Mikhailovich

*The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,
RUDN University, Moscow, Russia,
e-mail: horen25@mail.ru; SPIN: 7451-6291, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3720-2725>*

Ratner Svetlana Valerievna

*Institute of Control Science, Russian Academy of Sciences,
RUDN University, Moscow, Russia,
e-mail: lanarat@ipu.ru; SPIN code: 7840-4282;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>*

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-78-10089, <https://rscf.ru/project/22-78-10089/>

Abstract. Data Envelopment Analysis (DEA) in the last few decades was one of the fastest growing approaches to solving management problems for multi-criteria evaluation of the effectiveness of homogeneous economic agents. In the last year alone, more than 1,800 new papers have been published in this field, in which hybrid, multi-stage, and network models of DEA are increasingly being developed. Therefore, the purpose of this review study is to analyze, systematize and identify general trends in the development of DEA models over the past 5 years (2017–2020), their practical applications, as well as the most vital problems in the development of the methodology

Keywords: Data envelopment analysis, efficiency, productivity, multi-criteria estimation, network models, multistage models

Введение. Анализ среды функционирования (в англоязычной терминологии – Data Envelopment Analysis, DEA) в последние несколько десятилетий является одним из самых быстроразвивающихся подходов к решению управленческих задач по многокритериальной оценке эффективности однородных экономических агентов. Со времен выхода первой статьи Charnes в 1978 году, в которой предлагалась простейшая модель анализа среды функционирования с постоянным эффектом масштаба, количество научных работ, развивающих DEA и открывающих новые приложения данной методологии растет по экспоненте. На сегодняшний день в единой библиографической базе данных Scopus представлено 22725 публикаций и 1236 патентов по DEA, причем 1836 публикаций только за 2022 г. В русскоязычном сегменте научной литературы количество публикаций гораздо скромнее – 1689 публикаций в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU, однако их количество также резко возрастает в последние годы.

Такой интерес к DEA может быть объяснен несколькими факторами. Во-первых, данная методология расширяет привычное понятие экономической эффективности и позволяет исследовать его с разных сторон; не только оценивать эффективность, но и получать данные (в том числе, графические) для разработки оптимальной стратегии по ее достижению для неэффективных объектов. Во-вторых, DEA хорошо комбинируется с другими математическими методами и подходами – анализом временных рядов, корреляционно-регрессионным анализом, теорией игр и даже машинным обучением, что кардинальным образом расширяет спектр его возможных практических приложений. В-третьих, доступность современного программного обеспечения, как лицензионного, так и открытого доступа, открывает возможности для использования DEA в решении прикладных задач даже для неспециалистов в области математики.

Продолжающийся бурный рост количества публикаций в области анализа среды функционирования требует их систематизации и анализа по меньшей мере по основным параметрам. Следует отметить, что такие попытки предпринимались неоднократно. Например, в работе L.M. Seiford [1] анализируется библиография DEA за 1978–1996 гг. Автор статьи отмечает междисциплинарный характер многих исследований в данной области и указывает на необходимость разработки единого всеобъемлющего источника с целью систематизации и содействия всестороннему росту моделей DEA. В статье J.S. Liu, L.Y. Lu, W.-M. Lu и B.J. Lin [2], авторы на основе анализа цитирования провели отбор статей за период 1978–2010 гг., играющих центральную роль в развитии DEA, выделили наиболее активные подобласти DEA. В обзорной работе A. Emrouznejad, G.I. Yang [3] приводится

полный список публикаций по тематике DEA с 1978 г. по 2016 г., включая исследования теоретического и методологического характера, а также работы по развитию приложений в различных отраслях экономики. Авторы приводят сводную статистику роста публикаций, наиболее часто используемые академические журналы, анализ авторства, а также анализ ключевых слов. A. Panwar, M. Olfati, M. Pant в работе [4] приводят подробный анализ 40-летнего развития моделей DEA с точки зрения тенденций тематики публикаций и частоты цитируемости статей.

Кроме того, можно отметить обзоры использования DEA в отдельных отраслях. Так, S. Kaffash, R. Azizi, Y. Huang J. Zhu [5, p. 801–813] провели анализ приложений DEA в страховой отрасли. В работе охватывается период с 1993 г. по 2018 г. L.F.N. Adler, Z. Sinuany-Stern [6] провели обзор методов ранжирования в контексте DEA. S. Ratner, A. Lychev, A. Rozhnov и I. Lobanov [7] анализируют подходы DEA применительно к оценке экологических параметров функционирования экономических систем

W. Cooper [8] рассматривают имеющиеся достижения DEA и некоторые из его будущих перспектив, описывая модели, их свойства, взаимосвязи и перспективные пути развития, которые охватывают период с 1978 по 2007гг.

Однако, как уже было отмечено выше, только за последний год было опубликовано более 1800 новых статей по анализу среды функционирования, в которых все более активно развиваются гибридные и сетевые модели DEA, не получившие должного освещения в предыдущих обзорах. Поэтому целью настоящего обзорного исследования является анализ, систематизация и идентификация общих трендов развития моделей DEA и их практических приложений за 2017–2021 гг. Исследование было проведено методом систематического литературного обзора, который предполагает исследование динамики развития темы, выделение основных кластеров публикаций по формальным (географии, журналам, цитируемости, отраслям знаниям, отдельным исследователям) и неформальным (тематика) критериям.

Материалы и методы. Систематический литературный обзор, как правило, состоит из трех основных этапов: 1) поиск и скрининг литературных источников; 2) описательный анализ выборки публикаций 3) качественный контент-анализ отобранных литературных источников [2, 8 - 14]. Для обеспечения репрезентативности выборки публикаций и гарантий того, что в нее включено максимальное количество работ по интересующей тематике, как правило используют несколько баз данных литературных источников (SCOPUS, Web of Science, Science Direct и т.д.), поиск в которых осуществляется по нескольким вариативным наборам ключевых слов. Далее проводится скрининг выбранных литературных источников, в процессе которого проверяется соответствие заданным временным границам поиска, тематике, а также устраняется дублирование публикаций, которое часто возникает из-за различий в написании библиографических ссылок.

Описательный анализ выборки публикаций предполагает исследования динамики количества публикаций, распределение публикаций по отраслям знаний, географии авторов, самим авторам, цитируемости и т.д. [2 - 4]. Практически все современные базы научных источников позволяют провести такой анализ с помощью специальных инструментов практически автоматически. Описательный анализ позволяет выделить основные тенденции развития выбранного научного

направления, определить работы и ученых, оказавших наибольшее влияние на это развитие, идентифицировать наиболее актуальные проблемы. В результате данного этапа круг работ, отобранных для последующего качественного контент-анализа, как правило, несколько сужается.

В нашем исследовании поиск источников осуществлялся по 4 различным базам данных научной литературы. Три из них – англоязычные базы данных: SCOPUS, ScienceDirect и специализированная база научных работы по тематике анализа среды функционирования — <http://DEAzone.com/>. Русскоязычная база научной литература eLibrary использовалась только для проведения описательного анализа, чтобы сравнить тенденции развития англоязычного и русскоязычного сегментов литературы по данному научному направлению.

Поиск в англоязычных базах осуществлялся, по ключевым словам, ключевым словам [data AND envelopment AND analysis]. Глубина поиска задавалась в двух вариантах: за период с 1978 (дата выхода первой публикации) по 2022 гг. чтобы отследить тенденции развития за весь период существования научного направления и с 2017 по 2022 год, чтобы подробнее проанализировать тенденции развития за последние 5 лет и выделить наиболее активные подобласти DEA. В базе данных eLibrary поиск проводился по ключевому слову «Data envelopment analysis», результат всего 1356 статей и с общим количеством цитирований 6 264 в период с 1990 год по 2022 (31 год), так как данные есть только начиная с 1990 года. Причем в 2022 году всего 56 публикаций, а если уточнить ключевое слово на русском языке «анализ среды функционирования» результаты 135 публикаций с общим кол-вом цитирований 418 за 15 лет, с 2003 по 2022 гг.

Результаты. Динамика количества публикаций по тематике DEA, зарегистрированных в базе данных SCOPUS, представлена на рис. 1.



Рис. 1 Количество публикаций по тематике DEA в базе данных SCOPUS.

Источник: составлено авторами

Обращаясь к аналитике за весь период развития DEA, можно отметить, что количество публикаций за последние 5–6 лет сопоставимо с количеством публикаций за предыдущие 40 лет с 1978 г. Это, несомненно, подтверждает

увеличение интереса к данной проблематике, ее значимость и актуальность. Скачкообразный рост количества публикаций приходится на 2007–008 гг. В период 2014–2016 гг. в среднем выходило около 1000 работ в год, а в период 2017–2021 гг. – более 1600 работ в год.

Географическое распределение публикаций по странам представлено на рис. 2–3.

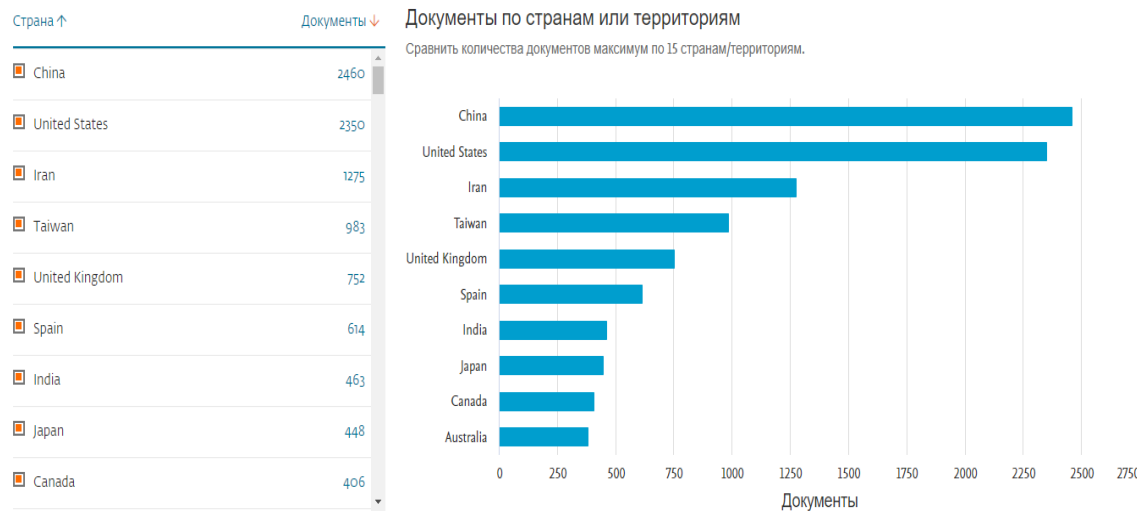


Рис. 2 Топ-10 стран по количеству публикаций по тематике DEA в период 1978-2016 гг. Источник: составлено авторами

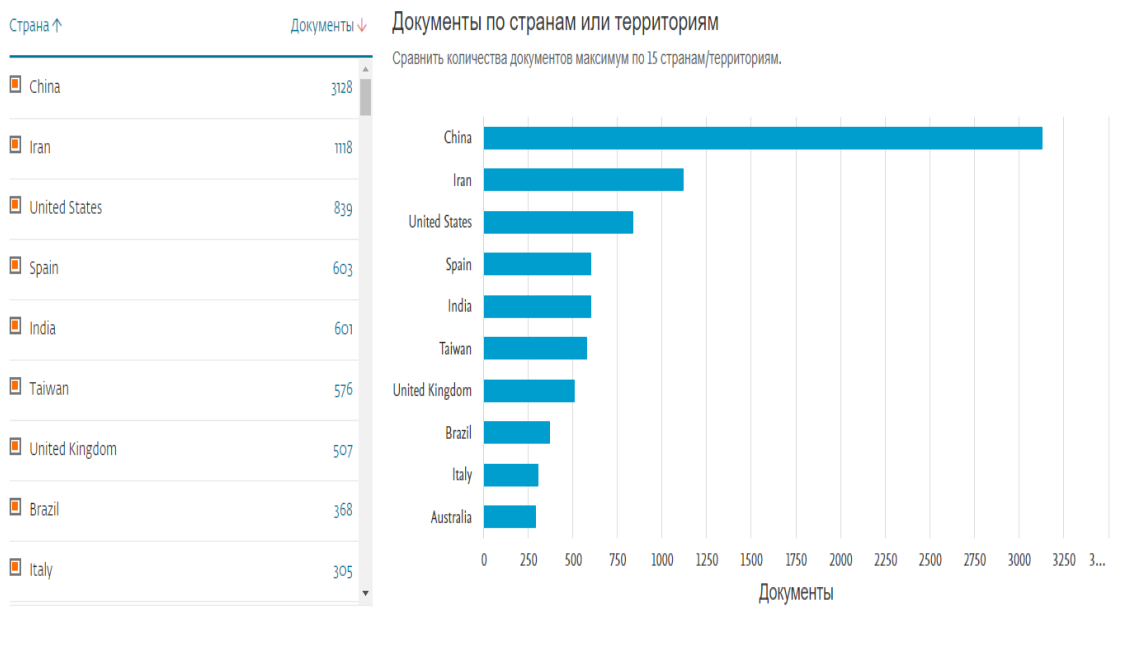


Рис. 3 Топ-10 стран по количеству публикаций по тематике DEA за 2017-2021 гг. Источник: составлено авторами

Заметим, что состав стран-лидеров по количеству публикаций в области DEA остается примерно стабильным. За последние 5 лет значительно увеличил

количество публикаций Иран, обогнав США. Также можно отметить рост интереса к тематике DEA в Италии и Бразилии.

Анализ публикаций по персоналиям показывает, что самыми публикуемыми авторами по тематике DEA в мире в период с 1978 по 2016 гг. является G.R. Jahanshahloo (Иран, 138 статей), L. Liang (Китай, 135 статей) и J. Zhu (США, 125 статей). Если рассматривать только последние пять лет, то наибольшее количество статей опубликовано под авторством A. Emrouznejad (Великобритания, 75 публикаций), J. Wu (Китай, 61 статья) и W.M. Lu (Китай, 56 статей). Из российских авторов наиболее количество работ по тематике DEA в SCOPUS имеют А.В. Лычев (14 статей), В.Е. Кривоножко (9 статей), М.Ю. Деревянов и Ю.Е. Плешивцева (по 6 работ).

Распределение публикаций по DEA по отраслям знаний представлено на рис. 4–5.

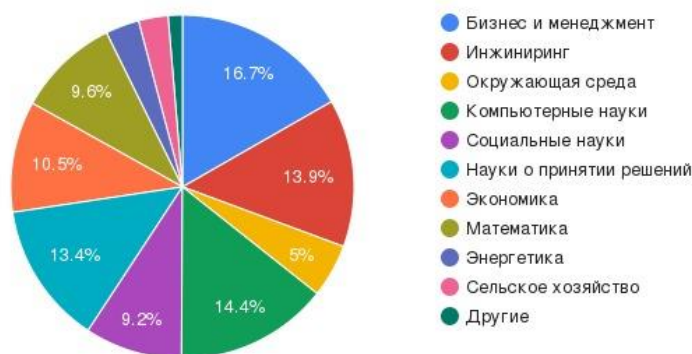


Рис. 4 Распределение публикаций по DEA по отраслям знаний (1978–2016 гг.).
 Источник: составлено авторами

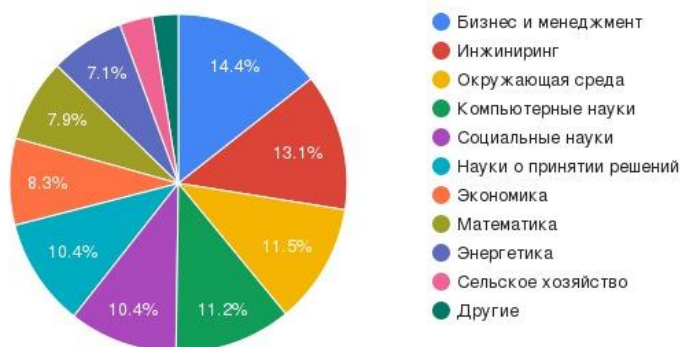


Рис. 5 Распределение публикаций по DEA по отраслям знаний за 2017–2021 гг.
 Источник: составлено авторами

Как в последние 5 лет, так и в предыдущие периоды, чаще всего DEA используется в бизнесе, управлении и бухгалтерском учете, инженерных и компьютерных науках. По сравнению с более ранним периодом заметно увеличение применения анализа среды функционирования в экологических и социальных науках.

Наиболее часто употребляемые ключевые слова в публикациях по тематике DEA (помимо самого термина Data Envelopment Analysis, а также смежных терминов Linear Programming, Mathematical Models, Problem Solving) представлены в табл. 1.

Анализируя статистику ключевых слов, можно отметить, что DEA чаще всего используется для решения задач в области оценки различных видов эффективности (технической, аллокационной) предприятий промышленности и организаций банковской сферы, в области повышения качества принятия решений, построения рейтингов, сокращения размерности данных, оценки энергоэффективности, бенчмаркинга, разработки стратегий устойчивого развития, оценки совокупной факторной производительности, конкуренции, затрат, прибыли и рентабельности. Среди методов, с которыми DEA чаще всего применяется совместно, можно отметить регрессионный анализ, анализ чувствительности и бутстрэппинг.

Реже всего DEA сочетается с ключевыми словами, представленными в таблице 2, что может свидетельствовать о недостаточном внимании исследователей к поиску возможностей применения DEA в области поведенческой экономики.

Для проведения контент-анализа статей по многоэтапным и сетевым моделям DEA, опубликованным в англоязычном сегменте научной литературы, в результате поисковых запросов сначала было отобрано 65 работ. При проведении анализа содержания статей выяснилось, что только 37 работ соответствуют обозначенной тематике, а остальные либо сами носят обзорный характер и лишь упоминают многоэтапные или сетевые модели DEA как один из типов моделей [15 - 32], либо под многоэтапностью в них понимается не особая структура ПО, а многоэтапность исследования [3, 5; 33 - 37]. В таких работах DEA применяется на каком-то определенном этапе исследования, тогда как на других используются другие методы экономико-математического моделирования, такие как регрессионный анализ, факторный анализ, бутстрэппинг.

Многоэтапные и сетевые модели DEA являются важным развитием методологии сравнительной оценки эффективности деятельности экономических агентов, предложенной изначально. Традиционные модели DEA рассматривают производственные объекты (DMU), как системы «черный ящик», о которых известны только входы и выходы. Преобразование входов в выходы неизвестно, из-за чего теряются промежуточные показатели, что, в свою очередь, приводит к невозможности разграничения и идентификации, какая именно часть производственного объекта ответственна за его общую неэффективность.

Таблица 1 - Наиболее часто используемые ключевые слова в публикациях по тематике DEA

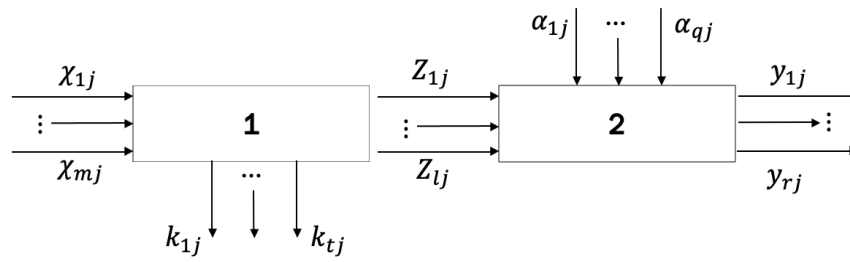
№	Ключевые слова	Количество публикаций		
		Всего с 1967	1978–2016 гг.	2017–2021 гг.
1	Эффективность, измерение эффективности (Efficiency, Efficiency measurement)	20 801	11 221	9 580
2	Результативность (Performance), Оценка результативности (Performance evaluation/ Performance assessment), Измерение результативности (Performance measurement)	16 110	8 579	7 531
3	Принятие решений (Decision making), Теория принятия решений (Decision theory)	9 516	5 407	4 109
4	Техническая эффективность (Technical efficiency)	4 611	2 589	2 022
5	Промышленность (Industry)	4 464	2 349	2 115
6	Продуктивность (Productivity)	3 517	1 974	1 543
7	Затраты (Costs)	3 389	1 908	1 481
8	Относительная эффективность (Relative efficiency)	2 922	1 874	1 048
9	Регрессионный анализ (Regression analysis)	2 377	1 110	1 267
10	Рейтинг (Ranking)	2 024	1 126	898
11	Энергоэффективность (Energy efficiency)	2 020	747	1 273
12	Экономика (Economics)	1 943	1 048	895
13	Организация (Organization)	1 875	1 070	805
14	Сокращение данных (Data reduction)	1 830	1 118	712
15	Отдача от масштаба (Returns to scale)	1 814	1 061	753
16	Оптимизация (Optimization)	1 751	910	841
17	Человек (human)	1 733	777	956
18	Индекс Малмквиста (Malmquist index)	1 643	811	832
19	Бенчмаркинг (Benchmarking)	1 575	941	634
20	Устойчивое развитие (Sustainable development)	1 428	382	1 046
21	Числовая модель (Numerical model)	1 321	731	590
22	Потребление (Consumption)	1 186	478	708
23	Банковское дело (Banking)	1 169	664	505
24	Конкуренция (Competition)	965	594	371
25	Организация и управление (Organization and management)	899	512	387
26	Прибыль (Profit)	883	507	376
27	Распределение ресурсов (Resource allocation)	865	434	431
28	Совокупная факторная производительность (Total factor productivity)	841	399	442
29	Обработка данных (Data handling)	660	546	114
30	Анализ чувствительности (Sensitivity analysis)	655	365	290
31	Рентабельность (Profitability)	645	371	274
32	Наука об управлении (Management science)	542	443	99
33	Бутстрэппинг (Bootstrapping)	458	235	223

Таблица 2 Наименее часто используемые ключевые слова в публикациях по тематике DEA

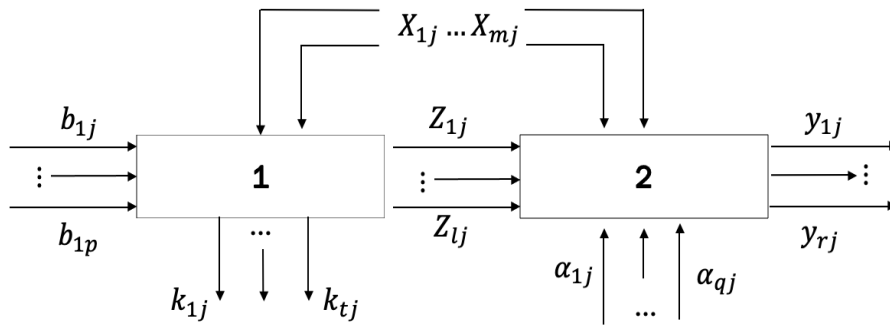
№	Ключевые слова	Количество публикаций		
		Всего с 1967	1978–2016 гг.	2017–2022 гг.
1	Потребительское поведение (Consumer behavior)	26	14	12
2	Поведенческая экономика (Behavioral economics)	19	12	7
3	Рациональное поведение (Rational behavior)	15	6	9
4	Ценностное предложение (Value proposition)	12	8	4
5	Иррациональное поведение (Irrational behavior)	2	0	2

Если же исследователю априори известны любые дополнительные сведения о структуре производственного объекта (DMU) или процессе его функционирования, то логичным развитием традиционной модели будет разбиение DMU на две или более подсистемы, которые связаны между собой так называемыми промежуточными выходами, т.е. такими выходами одной подсистемы, которые одновременно являются входами другой подсистемы. При введении такой усложнённой структуры ПО в модель значительно возрастает информативность результатов решения задачи и возможности для оптимизации стратегии функционирования моделируемых экономических агентов. В то же время возникают новые вопросы, связанные с тем, как рассчитывать общий (интегральный) коэффициент эффективности ПО как единой структуры.

В отобранных для детального анализа 37 работах встречается множество вариантов структуры ПО, которые можно разделить на два типа, представленных на рис. 6. Сразу отметим, что в литературе до сих пор не сложилось общего понимания, какую именно структуру считать сетевой, а какую – многоэтапной. Как видно из рисунка, в качестве основного различия между типами многоэтапных и сетевых моделей мы выделяем отсутствие (тип 1) или наличие (тип 2) общих входов, которые разделяются в определенной пропорции между подсистемами ПО. Данный фактор существенно влияет на вид оптимизационной модели и на подходы к ее решению. Распределение проанализированных работ по типу модели представлено в табл. 3.



Тип 1



Тип 2

Рис. 6 Основные типы сетевых и многоэтапных моделей DEA.
 Источник: составлено авторами

Таблица 3 - Типы моделей в зависимости от наличия или отсутствия общих входов

Тип модели	Статьи
Тип 1	Moheb-Alizadeh H., Handfield R. [17]; Coelli T. [28]; Henriques I.C., Sobreiro V.A. Kimura H. [38]; Arteaga F.J. S., Tavana M., Caprio D.D [39]; Chodakowska E., Nazarko J. [40]; Xionghe Q., Debin D, Mei-Po K. [41]; Amirkhan M., Didehkhani H., Khalili-Damghani K. [42]; Ajirlo S.F., Amirteimoori A., Kordrostami S. [43]; Rezaee M.J., Shokry M. [44]; Zhu W., Miao Z.Y., Pu X [45]; Anh D.L.T., Gan C. [46]; Zegordi S.H., Omid A [47]; Yu M.-M., See K.F [48]; Fukuyama H., Matousek R [49]; Shao L., Yu X., Feng C [50]; Zhang Li., Zhao L., Zha Y. [51]; Guo C., Shureshjani R.A., Foroughi A.A. [52]; Mavi R.K., Saen R.F., Goh M [53]; Badiezadeh T., Saen R.F., Samavati T. [54]; Iftikhar Y., Wang Z., Zhang B.[55]; Li H., Zhang J., Wang C. [56]; Khushalani J., Ozcan Y.A. [57]; Singh A.P., Yadav S.P. [58]; Akbarian D [59]; Li H., Xiong J., Xie J. [60]; Tavana M., Khalili-Damghani K., Arteaga F.J.S [61]; Yang G.-l., Fukuyama H., Song Y.-y. [62]; Kahi V.S., Yousefi S., Shabanpour H [63]; Wanke P., Ostovan S., Mozaffari M.R. [64]; Erturan M.B., Merdivenci F. [65].
Тип 2	Izadikhah M., Tavana M., Caprio D [66]; Zhou X., Xu Z., Chai J. [67]; Huang H., Li S.Yu Y. [68]; Huang T.-H., Chen K.-C., Lin C.-I. [69]; Zhang B., Luo Y., Chiu Y.-H [70]; Chen X., Liu Z., Zhu Q. [71]; Yin C., Gao W., Li Z. [72]; Qingxian A., Yao W., Tao D. [73].

Источник: составлено авторами

В наиболее общем случае структура ПО может состоять из сколь угодно большого количества подсистем, однако на практике практически не встречаются случаи, когда ПО состоит более чем из трех подсистем. Для простоты (однако, не умаляя общности) далее будем описывать структуры, состоящие из двух подсистем. Частными случаями моделей типа 1 являются модели, в которых: а) отсутствуют свободные выходы на первом этапе (т.е. все выходы первого этапа являются промежуточными); б) отсутствуют свободные входы на втором этапе (т.е. все входы второго этапа являются выходами первого); в) отсутствуют как свободные выходы первого этапа, так и свободные входы первого этапа. В моделях как первого, так и второго типов часть промежуточных и свободных выходов может быть нежелательными.

С теоретической точки зрения наиболее сложным моментом при постановке и решении многоэтапных задач ДЕА является способ расчета общего коэффициента эффективности. Можно выделить четыре основных подхода к решению данного вопроса:

1. Общий коэффициент эффективности рассчитывается независимо от коэффициентов эффективности каждой подсистемы (этапов). Все коэффициенты эффективности рассчитываются как отношение взвешенной линейной комбинации выходов к взвешенной линейной комбинации входов (всего ПО или его отдельных подсистем) (пример – статьи [46, 63]);

2. Общий коэффициент эффективности рассчитывается как свертка (аддитивная, мультипликативная) коэффициентов эффективности подсистем (статьи [45, 47, 48, 50, 52, 54, 56, 57, 58, 60, 64, 65, 67, 74]);

3. Общий коэффициент эффективности рассчитывается по теоретико-игровой кооперативной модели (статьи [42, 44, 60, 61, 66, 73]);

4. Общий коэффициент эффективности рассчитывается по некооперативной теоретико-игровой модели, как правило, модели Штакельберга «лидер-последователь» (статьи [60, 66, 72]).

Рассмотрим более подробно пример независимого расчета общего (системного) и частных коэффициентов эффективности [63, р. 1866–1889]. Рассматривается производственный процесс, состоящий из произвольного количества под-процессов (этапов). Кроме того, в модели вводится возможность учета динамики, т.е. эффективность каждого отдельного этапа (или подсистемы) находится в каждый момент времени как отношение

$$E_{pj} = \frac{\sum_{r=1}^S \lambda_{pr} Z_{jrt}^{p0} + \sum_{k=1}^K \beta_{pk} Z_{jkt}^{pp+1}}{\sum_{k=1}^K \beta_{pr} Z_{jkt}^{pp+1} + \sum_{i=1}^I \alpha_{pi} n_{jit}^{0p}}$$

где числитель представляет собой взвешенную сумму системных выходов и взвешенную сумму выходов, которые выходят из подсистемы этапа p и входят в подсистему этапа $p+1$. Знаменатель представляет собой взвешенную сумму входов, поступающих на этап $p+1$ непосредственно с этапа p , и взвешенную сумму входов, поступающих на этап p извне (дополнительные входы).

Здесь

n_{jit}^{0p} – i -тый вход j -го ПО в момент времени t на этапе p ;

Z_{jkt}^{pp+1} – k -тый промежуточный выход j -го ПО, выходящий из этапа p и входящий в этап $p+1$ в момент времени t ;

Z_{jrt}^{p0} - r -тый свободный выход j -го ПО, выходящий из этапа p в момент времени t ;
 λ_{pr} ; β_{pk} ; α_{pi} – соответствующие весовые коэффициенты.

Общая (системная) эффективность определяется как отношение

$$E_j = \frac{\sum_{p=1}^P (\sum_{r=1}^S \lambda_{pr} Z_{jkt}^{p0} + \sum_{k=1}^K \beta_{pk} Z_{jkt}^{pp+1})}{\sum_{k=1}^K \beta_{pr} Z_{jkt}^{pp+1} + \sum_{i=1}^I \alpha_{pi} n_{jit}^{op}}$$

Далее рассмотрим пример расчета коэффициента системной эффективности как свертки [58]. Рассматривается производственный процесс, состоящий из двух под-процессов (этапов). Первый этап использует m входов x_{ik} , $i = 1, 2, \dots, m$ для производства p промежуточных продуктов (выходов) z_{dk} , $d = 1, 2, 3, \dots, p$. На втором этапе используются все p промежуточных продуктов для производства s выходов y_{rk} , $r = 1, 2, 3, \dots, s$.

Пусть эффективность k -го ПО на первом этапе ступени равна E_k^1 , а на втором этапе равна E_k^2 . Оптимизационная задача для расчета эффективности первого этапа ставится следующим образом:

$$\max E_k^1 = \frac{\sum_{d=1}^p z_{dk} \omega_{dk}}{\sum_{i=1}^m x_{ik} u_{ik}}$$

при

$$\frac{\sum_{d=1}^p z_{dk} \omega_{dk}}{\sum_{i=1}^m x_{ik} u_{ik}} \leq 1;$$

$$u_{ik} \geq \varepsilon \forall i, \omega_{dk} \geq \varepsilon \forall p, \varepsilon > 0.$$

Оптимизационная задача для расчета коэффициента эффективности второго этапа ставится следующим образом:

$$\max E_k^2 = \frac{\sum_{r=1}^s y_{rk} v_{rk}}{\sum_{d=1}^p z_{dk} \omega_{dk}}$$

при

$$\frac{\sum_{r=1}^s y_{rj} v_{rk}}{\sum_{d=1}^p z_{di} \omega_{dk}} \leq 1;$$

$$v_{rk} \geq \varepsilon \forall r, \omega_{dk} \geq \varepsilon \forall p, \varepsilon > 0.$$

Предположим, для $u_{ik}^*, v_{rk}^*, \omega_{dk}^*$, - оптимальные весовые коэффициенты k -го ПО, полученные при расчете общей эффективности E_k , эффективности первого E_k^1 , и второго E_k^2 под-процессов, т.е.:

$$E_k = \frac{\sum_{r=1}^s y_{rk} v_{rk}}{\sum_{i=1}^m x_{ik} u_{ik}^*},$$

$$E_k^1 = \frac{\sum_{d=1}^p z_{dk} \omega_{dk}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ik} u_{ik}^*},$$

$$E_k^2 = \frac{\sum_{r=1}^s y_{rk} v_{rk}^*}{\sum_{d=1}^p z_{dk} \omega_{dk}^*},$$

Тогда

$$E_k = E_k^1 \times E_k^2$$

Пример расчета системной эффективности по кооперативной теоретико-игровой модели [66, р. 213–230]. Рассматривается производственный процесс,

состоящий из двух под-процессов (этапов). Общая (системная) эффективность p -го ПО определяется как

$$\theta_p = \max \frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dp}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bp}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hp}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ip}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tp}^2)} \times \frac{\sum_{r=1}^R u_r^2 y_{rp}^2}{\sum_{k=1}^K v_k^3 x_{kp}^3 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (1 - \alpha_t) x_{tp}^2 + \sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dp}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 (\beta_b) z_{bp}^2}$$

при

$$\frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bj}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hj}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ij}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tj}^2)} \leq 1;$$

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r^2 y_{rj}^2}{\sum_{k=1}^K v_k^3 x_{kj}^3 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (1 - \alpha_t) x_{tj}^2 + \sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 (\beta_b) z_{bj}^2} \leq 1;$$

$$\forall_j = 1, \dots, n,$$

$$w_d^1, w_b^2, u_r^2, v_k^3, v_t^2, v_i^1, u_h^1 \geq 0, \quad \forall_j = 1, \dots, D; b = 1, \dots, B;$$

$$r = 1, \dots, s; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T;$$

$$i = 1, \dots, I; h = 1, \dots, H$$

$$0 \leq \alpha_t \leq 1 \quad \forall_t = 1, \dots, T,$$

$$0 \leq \beta_b \leq 1 \quad \forall_b = 1, \dots, B.$$

где,

$DMU_j, \quad j=1, 2, \dots, n$	j -тый ПО.
$DMU_p,$	фиксированный ПО, для которого решается задача
$x_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, m$	i -ый вход Этапа 1 $DMU_j,$
$z_{dj}, \quad d=1, 2, \dots, D$	d -ый выход Этапа 1 $DMU_j,$
$y_{rj}, \quad r=1, 2, \dots, s$	r -ый выход Этапа 2 (окончательный или системный выход) для $DMU_j,$
$x_{hj}^2 \quad h=1, 2, \dots, H$	Дополнительный h -ый вход Этапа 2 $DMU_j,$
$v_i, \quad i=1, 2, \dots, m$	Вес исходного i -ого входа
$w_{dj}, \quad d=1, 2, \dots, D$	Вес исходного d -го выхода
$u_r, \quad r=1, 2, \dots, s$	Вес исходного r -го системного выхода
$q_h, \quad i=1, 2, \dots, H$	Вес дополнительного h -го входа
θ_p	Общая (системная) эффективность p -го DMU, $DMU_p,$

θ_{1p}	Эффективность этапа 1 (первая подсистема) DMU_p ,
θ_{2p}	Эффективность этапа 2 (вторая подсистема) DMU_p ,
θ_{1p}^U	Верхняя граница эффективности Этапа 1 для DMU_p ,
θ_{2p}^U	Верхняя граница эффективности Этапа 2 для DMU_p ,
θ_{1p}^L	Нижняя граница эффективности Этапа 1 для DMU_p ,
θ_{2p}^L	Верхняя граница эффективности Этапа 2 для DMU_p ,
ε	малое положительное число

Пример расчета системной эффективности по некооперативной теоретико-игровой модели [66, р. 213–230]. Эффективность лидера (без потери общности как лидер рассматривается первая подсистема) определяется как:

$$\theta_{1p}^U = \max \frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dp}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bp}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hp}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ip}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tp}^2)}$$

при

$$\frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bj}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hj}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ij}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tj}^2)} \leq 1;$$

$$\forall_j = 1, \dots, n,$$

$$w_d^1, w_b^2, u_h^1, v_i^1, v_t^2 \geq 0, \quad \forall_d = 1, \dots, D; b = 1, \dots, B;$$

$$h = 1, \dots, H; i = 1, \dots, m, t = 1, \dots, T$$

$$0 \leq \alpha_t \leq 1 \quad \forall_t = 1, \dots, T,$$

Эффективность последователя (без потери общности как последователь рассматривается вторая подсистема) определяется как

$$\theta_{2p}^L = \max \frac{\sum_{r=1}^R u_r^2 y_{rp}^2}{\sum_{k=1}^K v_k^3 x_{kp}^3 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (1 - \alpha_t) x_{tp}^2 + \sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dp}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 (\beta_b z_{bp}^2)}$$

при

$$\frac{\sum_{r=1}^R u_r^2 y_{rp}^2}{\sum_{k=1}^K v_k^3 x_{kj}^3 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (1 - \alpha_t) x_{tj}^2 + \sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 (\beta_b z_{bj}^2)} \leq 1; \quad \forall_j = 1, \dots, n,$$

$$\frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dp}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bp}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hp}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ip}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tp}^2)} = \theta_{1p}^U;$$

$$\frac{\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 + \sum_{b=1}^B w_b^2 z_{bj}^2 + \sum_{h=1}^H u_h^1 y_{hj}^1}{\sum_{i=1}^I v_i^1 x_{ij}^1 + \sum_{t=1}^T v_t^2 (\alpha_t x_{tj}^2)} \leq 1; \quad \forall_j = 1, \dots, n,$$

$$w_d^1, w_b^2, u_r^2, v_k^3, v_t^2, u_h^1, v_i^1, \geq 0,$$

$$\forall_d = 1, \dots, D; b = 1, \dots, B; r = 1, \dots, S; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T;$$

$$i = 1, \dots, I; h = 1, \dots, H$$

$$0 \leq \alpha_t \leq 1$$

$$0 \leq \beta_b \leq 1$$

$$\forall_t = 1, \dots, T,$$

$$\forall_b = 1, \dots, B.$$

Общая эффективность рассматривается как эффективность лидера.

Заметим, что в случае использования в качестве свертки для расчета интегрального коэффициента эффективности взвешенной линейной суммы коэффициентов эффективности подсистем, подходы 2 и 4 могут пересекаться. В этом случае веса каждого этапа отражают важность его вклада в общую деятельность всего производственного объекта.

Выводы. В результате проведенного системного литературного обзора англоязычных работ по многоэтапным и сетевым моделям DEA за последние 5 лет было выявлено отсутствие унифицированной терминологии и общепринятого понимания того, что считать многоэтапной моделью, а что сетевой. В некоторых работах под сетевыми моделями понимаются многоэтапные модели, у которых нет свободных выходов, кроме системных, то есть, например, для случая разбиения ПО на две подсистемы, все выходы первого ПО являются промежуточными. Однако такое понимание не является общепринятым, никаких определений авторы не вводят.

Наиболее активно многоэтапные модели DEA в настоящее время используются для моделирования и оценки эффективности деятельности банков, цепей поставок, состоящих из связки «поставщик – производитель – дистрибьютор», инновационных и высокотехнологичных компаний (или территорий), а также компаний, чья деятельность регламентируется жесткими экологическими нормами. Меньше всего многоэтапные модели DEA пока что применяются для моделирования потребительского поведения как последовательного процесса, состоящего из множества этапов, что объясняется неразвитостью подходов к измерению факторов потребительского поведения.

Как наиболее сложные можно выделить многоэтапные модели DEA с общими входами, которые пропорционально распределяются между отдельными подсистемами (этапами) ПО. Такие модели используют для решения проблемы неэффективного распределения ресурсов. С теоретической точки зрения особую проблему в данном случае представляет способ расчета системного (общего/интегрального) коэффициента эффективности.

В качестве дополнительного вывода данного исследования можно отметить, что применение лишь алгоритмического подхода к выбору публикаций для контент-анализа в данном случае (отсутствие унифицированной терминологии, быстро развивающаяся область) оказалось неэффективным. В результате поиска, по ключевым словам, и сетям цитирования в выборку попадает большое количество работ, содержательно не связанных с фокусом исследования, либо лишь косвенно затрагивающих тематику многоэтапных моделей DEA. Поэтому в

качестве совершенствования самого метода систематического литературного обзора можно указать как границы применимости алгоритмического подхода только зрелые области научного знания с устоявшейся терминологией.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны исследователям, занимающимся развитием методологии DEA и его практическими приложениями.

Литература

1. Seiford L.M. A Bibliography for Data Envelopment Analysis (1978–1996) // *Annals of Operations Research*. – 1997. – V. 73. – P. 393–438.
2. Liu J.S., Lu L.Y., Lu W.-M. Data envelopment analysis 1978–2010: a citation-based literature survey // *Omega*. – 2013. – V. 41(1). – P. 3–15.
3. Emrouznejad A., Yang G.I. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016 // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2018. – V. 61. – P. 4–8.
4. Panwar A., Olfati M., Pant M. A Review on the 40 Years of Existence of Data Envelopment Analysis Models: Historic Development and Current Trends. *Arch Computat Methods Eng*. – 2022. – V. 29. – P. 5397–5426.
5. Kaffash S., Azizi Ro., Huang Y., Zhu J. A survey of data envelopment analysis applications in the insurance industry 1993–2018 // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – V. 284. – Issue 3. – P. 801–813.
6. Adler L.F.N., Sinuany-Stern Z. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. // *Eur J Oper Res*. – 2002. – V. 140(2). – P. 249–265.
7. Ratner S., Lychev A., Rozhnov A. Efficiency Evaluation of Regional Environmental Management Systems in Russia Using Data Envelopment Analysis // *Mathematics*. – 2021. – V. 9. P. – 2210.
8. Cooper W., Seiford L., Tone K. models and measures for evaluating performances with DEA: past accomplishments and future prospects. // *J Prod Anal*. – 2007. – V. 28(3). – P. 151–163.
9. Liu J.S., Lu L.Y.Y., Lu W.-M. Research fronts in data envelopment analysis // *Omega*. – 2016. – V. 58. – P. 33–45.
10. Seiford L.M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995) // *Journal of productivity analysis*. – 1996. – V 7. – P. 99–137.
11. Gattoufi S., Oral M., Reisman A. Data envelopment analysis literature: a bibliography update (1951–2001) // *Journal of Socio-Economic Planning Sciences*. – 2004. – V. 38. – P. 159–229.
12. Emrouznejad A., Parker B.R., Tavares G. Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2008. – V. 42 (3). – P. 151–157.
13. Cook W.D., Seiford L.M. Data envelopment analysis (DEA) – Thirty years on // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – V. 192 (1). – P. 1–17.
14. Liu J.S., Lu L.Y.Y., Lu W.-M. A survey of DEA // *Omega (United Kingdom)*. – 2013. – V. 41 (5). – P. 893–902.
15. Xiang H. Integration and economic viability of fueling the future with green hydrogen: An integration of its determinants from renewable economics // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46. – №. 77. – P. 38145–38162.

16. Kaur H., Singh S. P. Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – V. 231. – P. 107830.
17. Moheb-Alizadeh H., Handfield R. An integrated chance-constrained stochastic model for efficient and sustainable supplier selection and order allocation // *International Journal of Production Research*. – 2018. – V. 56. – №. 21. – P. 6890–6916.
18. Zhu Q. A simple MILP to determine closest targets in non-oriented DEA model satisfying strong monotonicity // *Omega*. – 2018. – V. 79. – P. 1–8.
19. Kao T.W.D. Relating supply network structure to productive efficiency: A multi-stage empirical investigation // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – V. 259. – №. 2. – P. 469–485.
20. Huang H., Wang T. The total-factor energy efficiency of regions in China: based on three-stage SBM model // *Sustainability*. – 2017. – V. 9. – №. 9. – P. 1664.
21. Zhu Q. Determining closest targets on the extended facet production possibility set in data envelopment analysis: modeling and computational aspects // *European Journal of Operational Research*. – 2022. – V. 296. – №. 3. – P. 927–939.
22. Mehlawat M.K. Sustainable transportation planning for a three-stage fixed charge multi-objective transportation problem // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–37.
23. Krmac E., Djordjević B. A new DEA model for evaluation of supply chains: a case of selection and evaluation of environmental efficiency of suppliers. – *Symmetry*. – 2019. – V. 11 (4). – P. 565.
24. Nandy A., Singh P. K. Farm efficiency estimation using a hybrid approach of machine-learning and data envelopment analysis: Evidence from rural eastern India // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – V. 267. – P. 122106.
25. Lozano S., Soltani N. DEA target setting using lexicographic and endogenous directional distance function approaches // *Journal of Productivity Analysis*. – 2018. – V. 50. – P. 55–70.
26. Zhang L., Chen Y. Equivalent solutions to additive two-stage network data envelopment analysis // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – V. 264. – №. 3. – P. 1189–1191.
27. Jiang Z., Zhu H., Cao Y. Efficiency pattern and spatial strategy of ports in Yangtze River Delta Region // *Chinese Geographical Science*. – 2017. – V. 27. – P. 298–310.
28. Coelli T. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models // *Operations Research Letters*. – 1998. – V. 23. – №. 3-5. – P. 143–149.
29. Liu H. H. Applying three-stage DEA on the operational performance of foreign banks in Taiwan // *International Review of Applied Economics*. – 2018. – V. 32. – №. 1. – P. 104–118.
30. Contreras I. A review of the literature on DEA models under common set of weights // *Journal of Modelling in Management*. – 2020. – V. 15(4). P. 1277–1300.
31. Vortia P. Extent of farm mechanization and technical efficiency of rice production in some selected areas of Bangladesh // *GeoJournal*. – 2021. – V. 86. – P. 729–742.
32. Long Q., Song K. Operational performance evaluation of e-government microblogs under emergencies based on a dea method // *Information Systems Frontiers*. – 2021. – P. 1–18.
33. Cui Q., Yu L.T. A review of data envelopment analysis in airline efficiency: state of the art and prospects // *Journal of Advanced Transportation*. – 2021. – V. 2021. – P. 1–13.
34. Zhou H. Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – V. 264. – №. 1. – P. 1–16.
35. Emrouznejad A. Data Envelopment Analysis: Recent Developments and Challenges // *The Palgrave Handbook of Operations Research*. – 2022. – P. 307–350.
36. Izadikhah M. DEA Approaches for Financial Evaluation-A Literature Review // *Advances in Mathematical Finance and Applications*. – 2022. – V. 7. – №. 1. – P. 1–36.

37. Safari H., Jafarzadeh A.H., Fathi M.R. Evaluation of the branches of Iran Insurance Corporation based on data envelopment analysis-free disposal hull in the presence of weight restrictions // *International Journal of Mathematics in Operational Research*. – 2020. – V. 16. – №. 2. – P. 202–216.
38. Henriques I.C., Sobreiro V.A., Kimura H. Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions // *Expert Systems with Applications*. 2020. V. 161.
39. Arteaga F.J. S., Tavana M., Caprio D.D. A dynamic multi-stage slacks-based measure data envelopment analysis model with knowledge accumulation and technological evolution // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2019. – V. 278(2). – P. 448–462.
40. Chodakowska E., Nazarko J. Network DEA Models for Evaluating Couriers and Messengers // *Procedia Engineering*. – 2017. – V. 182. – P. 106–111.
41. Xiongh Q., Debin D., Mei-Po K. Spatial spillovers and value chain spillovers: evaluating regional R&D efficiency and its spillover effects in China // *Scientometrics*, Springer; Akadémiai Kiadó. – 2019. – V. 119(2). – P. 721–747.
42. Amir Khan M., Didehkhani H., Khalili-Damghani K. Measuring Performance of a Three-Stage Network Structure Using Data Envelopment Analysis and Nash Bargaining Game: A Supply Chain Application // *International Journal of Information Technology & Decision Making*. – 2018. – V. 17(05). – P. 1429–1467.
43. Ajirloo S.F., Amirteimoori A., Kordrostami S. Two-stage additive integer-valued data envelopment analysis models: A case of Iranian power industry // *Journal of Modelling in Management*. – 2019. – V. 14(1). – P. 199–213.
44. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using data envelopment analysis // *International Journal of Management Science and Engineering Management*. – 2017. – V. 12(4). – P. 245–255.
45. Zhu W., Miao Z.Y., Pu X. Serial network DEA models with a single intermediate measure // *Journal of the Operational Research Society*. – 2021. – V. 72(5). – P. 1168–1173.
46. Anh D.L.T., Gan C. Profitability and marketability efficiencies of Vietnam manufacturing firms: An application of a multi-stage process // *International Journal of Social Economics*. – 2020. – V. 47(1). – P. 54–71.
47. Zegordi S.H., Omid A. Efficiency assessment of Iranian Handmade Carpet Company by network DEA // *Scientia Iranica*. – 2017. – V. 25(1).
48. Yu M.-M., See K.F. Evaluating the efficiency of global airlines: A new weighted SBM-NDEA approach with non-uniform abatement factor // *Research in Transportation Business & Management*. – 2022. – 100860.
49. Fukuyama H., Matousek R. Modelling bank performance: A network DEA approach // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2017. – V. 259(2). – P. 721–732.
50. Shao L., Yu X., Feng C. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network data envelopment analysis. // *Journal of Environ Manage*. – 2019 – V. 247. – P. 551–560.
51. Zhang Li., Zhao L., Zha Y. Efficiency evaluation of Chinese regional industrial systems using a dynamic two-stage DEA approach // *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier. – 2021. – V. 77(C).
52. Guo C., Shureshjani R.A., Foroughi A.A. Decomposition weights and overall efficiency in two-stage additive network DEA // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2017. – V. 257(3). – P. 896–906.
53. Mavi R.K., Saen R.F., Goh M. Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach // *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier. – 2019. – V. 144(C). – P. 553–562.

54. Badiezadeh T., Saen R.F., Samavati T. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. // *Computers & Operations Research*. – 2018. – V. 98. – P. 284–290.
55. Iftikhar Y., Wang Z., Zhang B. Energy and CO2 emissions efficiency of major economies: A network DEA approach // *Energy*, Elsevier. – 2018. – V. 147(C). – P. 197–207.
56. Li H., Zhang J., Wang C. An evaluation of the impact of environmental regulation on the efficiency of technology innovation using the combined DEA model: A case study of Xi'an, China // *Sustainable Cities and Society*. – 2018. – V. 42(9). – P. 355–369.
57. Khushalani J., Ozcan Y.A. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DEA) // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2017. – V. 60. – P. 15–23.
58. Singh A.P., Yadav S.P. A Two-stage Network Data Envelopment Analysis: An Education Sector Application // arXiv preprint arXiv:2206.01561. – 2022/6/3.
59. Akbarian D. Network DEA based on DEA-ratio // *Financial Innovation*, Springer; Southwestern University of Finance and Economics. – 2021. – V. 7(1). – P. 1–26.
60. Li H., Xiong J., Xie J. A unified approach to efficiency decomposition for a two-stage network DEA model with application of performance evaluation in banks and sustainable product design // *Sustainability*. – 2019. – V. 11 (16). – P. 4401.
61. Tavana M., Khalili-Damghani K., Arteaga F.J.S. Efficiency decomposition and measurement in two-stage fuzzy DEA models using a bargaining game approach // *Computers & Industrial Engineering*. – 2018. – V. 118. – P. 394–408.
62. Yang G.-l., Fukuyama H., Song Y.-y. Measuring the inefficiency of Chinese research universities based on a two-stage network DEA model. // *Journal of Informetrics*, Elsevier. – 2018. – V. 12(1). – P. 10–30.
63. Kahi V.S., Yousefi S., Shabanpour H. How to evaluate sustainability of supply chains? A dynamic network DEA approach // *Industrial Management & Data Systems*. – 2017. – V. 117(9). – P. 1866–1889.
64. Wanke P., Ostovan S., Mozaffari M.R. Stochastic network DEA-R models for two-stage systems // *Journal of Modelling in Management*. – 2022. – Vol. ahead-of-print. – № ahead-of-print.
65. Erturan M.B., Merdivenci F. LPI Based Two Stage Network DEAModel to Measure Logistics Efficiency: An Application on OECD Countries, *Journal of Business Research-Turk*. – 2021. – V. 13 (2). – P. 1187–1199.
66. Izadikhah M., Tavana M., Caprio D. A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // *Expert Systems with Applications*. – 2018. – V. 99(1). – P. 213–230.
67. Zhou X., Xu Z., Chai J. Efficiency evaluation for banking systems under uncertainty: A multi-period three-stage DEA model // *Omega*, Elsevier. – 2019. – V. 85(C). – P. 68–82.
68. Huang H., Li S. Yu Y. Evaluation of the allocation performance in a fashion retail chain using data envelopment analysis // *The Journal of The Textile Institute*. 2– 019. – V. 110(6). – P. 901–910.
69. Huang T.-H., Chen K.-C., Lin C.-I. An extension from network DEA to copula-based network SFA: Evidence from the U.S. commercial banks in 2009 // *The Quarterly Review of Economics and Finance*, Elsevier. – 2018. – V. 67(C). – P. 51–62.
70. Zhang B., Luo Y., Chiu Y.-H. Efficiency evaluation of China's high-tech industry with a multi-activity network data envelopment analysis approach // *Socio-Economic Planning Sciences*. Elsevier. – 2019. – V. 66(C). – P. 2–9.
71. Chen X., Liu Z., Zhu Q. Performance evaluation of China's high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain // *Technovation*. – 2018. – V. 74–75. – P. 42–53.

72. Yin C., Gao W., Li Z. Improved two-stage DEA model: an application to logistics efficiency evaluation enterprise in xiamen, China // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. – 2019. – V. 15. – № 2. – P. 535–549.

73. Qingxian A., Yao W., Tao D. Resource sharing and payoff allocation in a three-stage system: Integrating network DEA with the Shapley value method // *Omega*. – 2019. – V. 85. – P. 16–25.

References

1. Seiford L.M. A Bibliography for Data Envelopment Analysis (1978–1996) // *Annals of Operations Research*. – 1997. – V. 73. – P. 393–438.

2. Liu J.S., Lu L.Y., Lu W.-M. Data envelopment analysis 1978–2010: a citation-based literature survey // *Omega*. – 2013. – V. 41(1). – P. 3–15.

3. Emrouznejad A., Yang G.I. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016 // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2018. – V. 61. – P. 4–8.

4. Panwar A., Olfati M., Pant M. A Review on the 40 Years of Existence of Data Envelopment Analysis Models: Historic Development and Current Trends. *Arch Computat Methods Eng*. – 2022. – V. 29. – P. 5397–5426.

5. Kaffash S., Azizi Ro., Huang Y., Zhu J. A survey of data envelopment analysis applications in the insurance industry 1993–2018 // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – V. 284. – Issue 3. – P. 801–813.

6. Adler L.F.N., Sinuany-Stern Z. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. // *Eur J Oper Res*. – 2002. – V. 140(2). – P. 249–265.

7. Ratner S., Lychev A., Rozhnov A. Efficiency Evaluation of Regional Environmental Management Systems in Russia Using Data Envelopment Analysis // *Mathematics*. – 2021. – V. 9. P. – 2210.

8. Cooper W., Seiford L., Tone K. models and measures for evaluating performances with DEA: past accomplishments and future prospects. // *J Prod Anal*. – 2007. – V. 28(3). – P. 151–163.

9. Liu J.S., Lu L.Y.Y., Lu W.-M. Research fronts in data envelopment analysis // *Omega*. – 2016. – V. 58. – P. 33–45.

10. Seiford L.M. Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995) // *Journal of productivity analysis*. – 1996. – V 7. – P. 99–137.

11. Gattoufi S., Oral M., Reisman A. Data envelopment analysis literature: a bibliography update (1951–2001) // *Journal of Socio-Economic Planning Sciences*. – 2004. – V. 38. – P. 159–229.

12. Emrouznejad A., Parker B.R., Tavares G. Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2008. – V. 42 (3). – P. 151–157.

13. Cook W.D., Seiford L.M. Data envelopment analysis (DEA) – Thirty years on // *European Journal of Operational Research*. – 2009. – V. 192 (1). – P. 1–17.

14. Liu J.S., Lu L.Y.Y., Lu W.-M. A survey of DEA // *Omega (United Kingdom)*. – 2013. – V. 41 (5). – P. 893–902.

15. Xiang H. Integration and economic viability of fueling the future with green hydrogen: An integration of its determinants from renewable economics // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46. – №. 77. – P. 38145–38162.

16. Kaur H., Singh S. P. Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – V. 231. – P. 107830.

17. Moheb-Alizadeh H., Handfield R. An integrated chance-constrained stochastic model for efficient and sustainable supplier selection and order allocation // *International Journal of Production Research*. – 2018. – V. 56. – №. 21. – P. 6890–6916.
18. Zhu Q. A simple MILP to determine closest targets in non-oriented DEA model satisfying strong monotonicity // *Omega*. – 2018. – V. 79. – P. 1–8.
19. Kao T.W.D. Relating supply network structure to productive efficiency: A multi-stage empirical investigation // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – V. 259. – №. 2. – P. 469–485.
20. Huang H., Wang T. The total-factor energy efficiency of regions in China: based on three-stage SBM model // *Sustainability*. – 2017. – V. 9. – №. 9. – P. 1664.
21. Zhu Q. Determining closest targets on the extended facet production possibility set in data envelopment analysis: modeling and computational aspects // *European Journal of Operational Research*. – 2022. – V. 296. – №. 3. – P. 927–939.
22. Mehlawat M.K. Sustainable transportation planning for a three-stage fixed charge multi-objective transportation problem // *Annals of Operations Research*. – 2019. – P. 1–37.
23. Krmac E., Djordjević B. A new DEA model for evaluation of supply chains: a case of selection and evaluation of environmental efficiency of suppliers. – *Symmetry*. – 2019. – V. 11 (4). – P. 565.
24. Nandy A., Singh P. K. Farm efficiency estimation using a hybrid approach of machine-learning and data envelopment analysis: Evidence from rural eastern India // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – V. 267. – P. 122106.
25. Lozano S., Soltani N. DEA target setting using lexicographic and endogenous directional distance function approaches // *Journal of Productivity Analysis*. – 2018. – V. 50. – P. 55–70.
26. Zhang L., Chen Y. Equivalent solutions to additive two-stage network data envelopment analysis // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – V. 264. – №. 3. – P. 1189–1191.
27. Jiang Z., Zhu H., Cao Y. Efficiency pattern and spatial strategy of ports in Yangtze River Delta Region // *Chinese Geographical Science*. – 2017. – V. 27. – P. 298–310.
28. Coelli T. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models // *Operations Research Letters*. – 1998. – V. 23. – №. 3-5. – P. 143–149.
29. Liu H. H. Applying three-stage DEA on the operational performance of foreign banks in Taiwan // *International Review of Applied Economics*. – 2018. – V. 32. – №. 1. – P. 104–118.
30. Contreras I. A review of the literature on DEA models under common set of weights // *Journal of Modelling in Management*. – 2020. – V. 15(4). P. 1277–1300.
31. Vortia P. Extent of farm mechanization and technical efficiency of rice production in some selected areas of Bangladesh // *GeoJournal*. – 2021. – V. 86. – P. 729–742.
32. Long Q., Song K. Operational performance evaluation of e-government microblogs under emergencies based on a dea method // *Information Systems Frontiers*. – 2021. – P. 1–18.
33. Cui Q., Yu L.T. A review of data envelopment analysis in airline efficiency: state of the art and prospects // *Journal of Advanced Transportation*. – 2021. – V. 2021. – P. 1–13.
34. Zhou H. Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions // *European Journal of Operational Research*. – 2018. – V. 264. – №. 1. – P. 1–16.
35. Emrouznejad A. Data Envelopment Analysis: Recent Developments and Challenges // *The Palgrave Handbook of Operations Research*. – 2022. – P. 307–350.
36. Izadikhah M. DEA Approaches for Financial Evaluation-A Literature Review // *Advances in Mathematical Finance and Applications*. – 2022. – V. 7. – №. 1. – P. 1–36.

37. Safari H., Jafarzadeh A.H., Fathi M.R. Evaluation of the branches of Iran Insurance Corporation based on data envelopment analysis-free disposal hull in the presence of weight restrictions // *International Journal of Mathematics in Operational Research*. – 2020. – V. 16. – №. 2. – P. 202–216.
38. Henriques I.C., Sobreiro V.A. Kimura H. Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions // *Expert Systems with Applications*. 2020. V. 161.
39. Arteaga F.J. S., Tavana M., Caprio D.D. A dynamic multi-stage slacks-based measure data envelopment analysis model with knowledge accumulation and technological evolution // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2019. – V. 278(2). – P. 448–462.
40. Chodakowska E., Nazarko J. Network DEA Models for Evaluating Couriers and Messengers // *Procedia Engineering*. – 2017. – V. 182. – P. 106–111.
41. Xiongh Q., Debin D, Mei-Po K. Spatial spillovers and value chain spillovers: evaluating regional R&D efficiency and its spillover effects in China // *Scientometrics*, Springer; *Akadémiai Kiadó*. – 2019. – V. 119(2). – P. 721–747.
42. Amirkhan M., Didekhani H., Khalili-Damghani K. Measuring Performance of a Three-Stage Network Structure Using Data Envelopment Analysis and Nash Bargaining Game: A Supply Chain Application // *International Journal of Information Technology & Decision Making*. – 2018. – V. 17(05). – P. 1429–1467.
43. Ajirlo S.F., Amirteimoori A., Kordrostami S. Two-stage additive integer-valued data envelopment analysis models: A case of Iranian power industry // *Journal of Modelling in Management*. – 2019. – V. 14(1). – P. 199–213.
44. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using data envelopment analysis // *International Journal of Management Science and Engineering Management*. – 2017. – V. 12(4). – P. 245–255.
45. Zhu W., Miao Z.Y., Pu X. Serial network DEA models with a single intermediate measure // *Journal of the Operational Research Society*. – 2021. – V. 72(5). – P. 1168–1173.
46. Anh D.L.T., Gan C. Profitability and marketability efficiencies of Vietnam manufacturing firms: An application of a multi-stage process // *International Journal of Social Economics*. – 2020. – V. 47(1). – P. 54–71.
47. Zegordi S.H., Omid A. Efficiency assessment of Iranian Handmade Carpet Company by network DEA // *Scientia Iranica*. – 2017. – V. 25(1).
48. Yu M.-M., See K.F. Evaluating the efficiency of global airlines: A new weighted SBM-NDEA approach with non-uniform abatement factor // *Research in Transportation Business & Management*. – 2022. – 100860.
49. Fukuyama H., Matousek R. Modelling bank performance: A network DEA approach // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2017. – V. 259(2). – P. 721–732.
50. Shao L., Yu X., Feng C. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network data envelopment analysis. // *Journal of Environ Manage*. – 2019 – V. 247. – P. 551–560.
51. Zhang Li., Zhao L., Zha Y. Efficiency evaluation of Chinese regional industrial systems using a dynamic two-stage DEA approach // *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier. – 2021. – V. 77(C).
52. Guo C., Shureshjani R.A., Foroughi A.A. Decomposition weights and overall efficiency in two-stage additive network DEA // *European Journal of Operational Research*, Elsevier. – 2017. – V. 257(3). – P. 896–906.
53. Mavi R.K., Saen R.F., Goh M. Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach // *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier. – 2019. – V. 144(C). – P. 553–562.

54. Badiezadeh T., Saen R.F., Samavati T. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. // *Computers & Operations Research*. – 2018. – V. 98. – P. 284–290.
55. Iftikhar Y., Wang Z., Zhang B. Energy and CO2 emissions efficiency of major economies: A network DEA approach // *Energy*, Elsevier. – 2018. – V. 147(C). – P. 197–207.
56. Li H., Zhang J., Wang C. An evaluation of the impact of environmental regulation on the efficiency of technology innovation using the combined DEA model: A case study of Xi'an, China // *Sustainable Cities and Society*. – 2018. – V. 42(9). – P. 355–369.
57. Khushalani J., Ozcan Y.A. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DEA) // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2017. – V. 60. – P. 15–23.
58. Singh A.P., Yadav S.P. A Two-stage Network Data Envelopment Analysis: An Education Sector Application // *arXiv preprint arXiv:2206.01561*. – 2022/6/3.
59. Akbarian D. Network DEA based on DEA-ratio // *Financial Innovation*, Springer; Southwestern University of Finance and Economics. – 2021. – V. 7(1). – P. 1–26.
60. Li H., Xiong J., Xie J. A unified approach to efficiency decomposition for a two-stage network DEA model with application of performance evaluation in banks and sustainable product design // *Sustainability*. – 2019. – V. 11 (16). – P. 4401.
61. Tavana M., Khalili-Damghani K., Arteaga F.J.S. Efficiency decomposition and measurement in two-stage fuzzy DEA models using a bargaining game approach // *Computers & Industrial Engineering*. – 2018. – V. 118. – P. 394–408.
62. Yang G.-l., Fukuyama H., Song Y.-y. Measuring the inefficiency of Chinese research universities based on a two-stage network DEA model. // *Journal of Informetrics*, Elsevier. – 2018. – V. 12(1). – P. 10–30.
63. Kahi V.S., Yousefi S., Shabanpour H. How to evaluate sustainability of supply chains? A dynamic network DEA approach // *Industrial Management & Data Systems*. – 2017. – V. 117(9). – P. 1866–1889.
64. Wanke P., Ostovan S., Mozaffari M.R. Stochastic network DEA-R models for two-stage systems // *Journal of Modelling in Management*. – 2022. – Vol. ahead-of-print. – № ahead-of-print.
65. Erturan M.B., Merdivenci F. LPI Based Two Stage Network DEAModel to Measure Logistics Efficiency: An Application on OECD Countries, *Journal of Business Research-Turk*. – 2021. – V. 13 (2). – P. 1187–1199.
66. Izadikhah M., Tavana M., Caprio D. A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs // *Expert Systems with Applications*. – 2018. – V. 99(1). – P. 213–230.
67. Zhou X., Xu Z., Chai J. Efficiency evaluation for banking systems under uncertainty: A multi-period three-stage DEA model // *Omega*, Elsevier. – 2019. – V. 85(C). – P. 68–82.
68. Huang H., Li S.Yu Y. Evaluation of the allocation performance in a fashion retail chain using data envelopment analysis // *The Journal of The Textile Institute*. 2– 019. – V. 110(6). – P. 901–910.
69. Huang T.-H., Chen K.-C., Lin C.-I. An extension from network DEA to copula-based network SFA: Evidence from the U.S. commercial banks in 2009 // *The Quarterly Review of Economics and Finance*, Elsevier. – 2018. – V. 67(C). – P. 51–62.
70. Zhang B., Luo Y., Chiu Y.-H. Efficiency evaluation of China's high-tech industry with a multi-activity network data envelopment analysis approach // *Socio-Economic Planning Sciences*. Elsevier. – 2019. – V. 66(C). – P. 2–9.

71. Chen X., Liu Z., Zhu Q. Performance evaluation of China's high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain // *Technovation*. – 2018. – V. 74–75. – P. 42–53.

72. Yin C., Gao W., Li Z. Improved two-stage DEA model: an application to logistics efficiency evaluation enterprise in xiamen, China // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. – 2019. – V. 15. – № 2. – P. 535–549.

73. Qingxian A., Yao W., Tao D. Resource sharing and payoff allocation in a three-stage system: Integrating network DEA with the Shapley value method // *Omega*. – 2019. – V. 85. – P. 16–25.

Поступила в редакцию 16 марта 2023 г.