

DOI: 10.34020/2073-6495-2019-2-226-242

УДК 330.4:622.22.003.1

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ ОТКРЫТОГО СПОСОБА
ДОБЫЧИ УГЛЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО СДВИГА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УКЛАДА**

Шелегеда Б.Г., Корнев М.Н., Погоржельская Н.В.

Донецкая академия управления и государственной службы
E-mail: shelegeda.bg@gmail.com, kornev007@yandex.ru, pnv686@gmail.com

Россиян С.А.

Донецкий национальный технический университет
E-mail: st_russ@mail.ru

Неклюдова В.Л.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий
E-mail: neklyudova@ssga.ru

В статье рассматриваются актуальные теоретические вопросы методологического обоснования перехода на новый уровень технологического уклада с использованием инструментов цифровизации через автоматизацию и роботизацию производственных процессов. Приведена динамика статистических данных, подтверждающих значение и перспективу освоения природных ископаемых России, а также возможности энергетического экспорта в другие страны. Применение роботов в технологическом процессе добычи угля открытым способом обосновано математическим методом теории нечетких множеств и показателями трансформационных структурных изменений.

Ключевые слова: цифровизация, открытый способ добычи угля, роботизация, технологический уклад, характеристики обычного и «умного» карьера, экономико-математические методы.

**DIGITIZATION OF OPEN-PIT COAL MINING
ON THE BASIS OF THE STRUCTURAL SHIFT
OF TECHNOLOGICAL MODE**

Shelegeda B.G., Kornev M.N., Pogorzhelskaya N.V.

Donetsk Academy of Management and Public Administration
E-mail: shelegeda.bg@gmail.com, kornev007@yandex.ru, pnv686@gmail.com

Russijan S.A.

Donetsk National Technical University
E-mail: st_russ@mail.ru

Neklyudova V.L.

Siberian State University of Geosystems and Technologies
E-mail: neklyudova@ssga.ru

The article considers topical theoretical issues of the methodological justification for transition to a new level of the technological mode with the use of digitization tools via robot automation of production processes. The statistical data dynamics was presented

to prove the importance and perspective of resource development in Russia as well as the possibility of energy export to other countries. The use of robots in the technological process of open-pit coal mining is proved by mathematical method of the fuzzy sets theory and indicators of the transformation structural changes.

Key words: digitization, open-pit coal mining, robot automation, technological mode, characteristics of common and «smart» pit, economic and mathematical methods.

Непрерывное развитие мировых рынков обуславливает интенсивность передачи информации с помощью цифровизации всех отраслей народного хозяйства. В текущих условиях, когда спрос на энергоресурсы остается нестабильным, угледобывающие компании стремятся к быстрой реакции на изменение спроса и предложения на рынке товаров и услуг. В результате многие угольные предприятия оптимизируют бизнес-процессы, сокращая влияние человеческого фактора с помощью автоматизации и роботизации производственной деятельности.

Целью статьи является обоснование стратегического развития угольной промышленности России с учетом энергетического потенциала страны на основе применения инструментов цифровизации в технологическом процессе карьерной добычи угля открытым способом путем полной автоматизации производственных погрузочно-транспортных работ, что способствует переходу к 6-му технологическому укладу, снижению удельных затрат, повышению безопасности и социально-экономического эффекта горнодобывающих предприятий.

При этом решаются следующие задачи:

- управление затратами на создание инфраструктуры в удаленных и труднодоступных местах;
- максимальное повышение эффективности парка техники и соответствующих технологических процессов;
- решение проблемы дефицита квалифицированных кадров;
- неукоснительное соблюдение требований охраны труда и повышение безопасности производственных работников;
- изменение режима ведения добычи угля за счет регулирования ширины дорог, зоны погрузки и углов бортов карьера.

В условиях структурной трансформации экономики возрастает значение энергоресурсов, а среди различных источников, в том числе возобновляемых, уголь по-прежнему остается приоритетным видом топлива, на который приходится около 40 % общемировой генерации. Так, в последние десятилетия мировое потребление угля росло в среднем на 0,8 % в год, достигнув 3 732 млн т н.э.¹ в 2017 г., что почти вдвое превышает уровень 1990 г. Существенные изменения претерпела и территориальная структура потребления угля за счет азиатских стран, включая Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР), Новую Зеландию и Австралию, что составило 2/3 мирового объема при одновременном сокращении этого показателя (почти наполовину) в Европе и России (табл. 1).

Таким образом, на мировых рынках наблюдается ежегодное сокращение потребления угля в Европе, в то время как в Азии объем международной торговли этим сырьем растет. Основным локомотивом роста высту-

¹Тонна нефтяного эквивалента (т н.э.) равна 1,4 т угля.

Таблица 1

Динамика мирового потребления угля, млн т н.э.

Показатель	1990 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2017 г.	Удельный вес в % к 1990 г.	Удельный вес в % к 2017 г.
Мировое потребление, всего	2222,3	2356,3	3105,7	3605,6	3731,5	100	100
Северная Америка	489,5	577,7	616,0	536,3	363,8	22,0	9,7
Южная и Центральная Америка	15,8	21,0	21,2	28,1	32,7	0,7	0,9
Африка	75,5	82,8	89,3	100,1	93,1	3,4	2,5
Азия (включая АТР, Новую Зеландию и Австралию)	840,4	1144,0	1883,1	2438,6	2780,0	37,8	74,5
Европа и Евразия (включая Ближний Восток)	801,1	530,9	524,9	502,6	461,9	36,1	12,4
В том числе Россия	338,0	232,0	213,0	212,0	232,0	15,2	6,2

Источник: составлено авторами на основе [20, 29].

пает Китай, который сократил собственные мощности по добыче в ходе реструктуризации экономики, что на фоне подъема спроса обусловило дефицит предложения на уровне около 10 млн т н.э. в 2017 г. Согласно отдельным прогнозам прирост мирового спроса на уголь до 2025–2030 гг. составит не менее 2 % [30].

Несмотря на данные тенденции и снижение внутреннего потребления угля более чем на 10 %, Россия в 2017 г. экспортировала более 135 млн т н.э. этого сырья, уверенно занимая третье место в мировой торговле. Добычу угля в России (на начало 2018 г.) осуществляли 180 угольных предприятий (61 угольная шахта и 119 разрезов совокупной мощностью 300 млн т н.э.) в семи федеральных округах и 25 субъектах Российской Федерации. При этом более 85 % общероссийской добычи угля сосредоточено в Сибирском ФО с преимущественным использованием открытого способа (рис. 1).

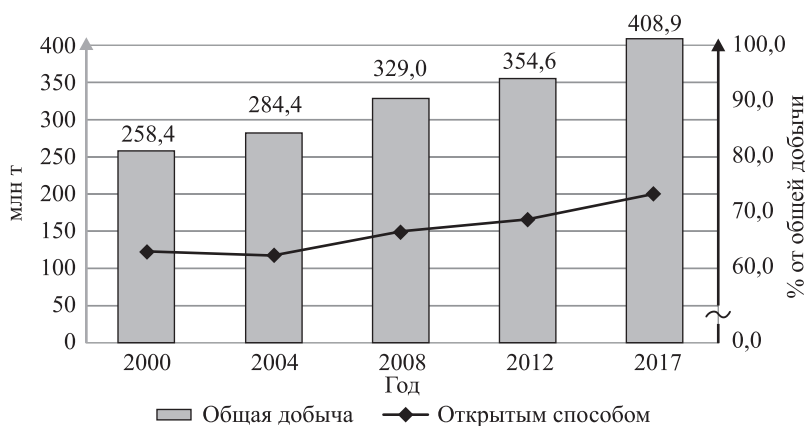


Рис. 1. Динамика добычи угля в Российской Федерации в 2000–2017 гг.

Источник: составлено авторами на основе [16]²

Среди угледобывающих предприятий Российской Федерации несомненным лидером по добыче открытым способом и экспорту угля является АО «СУЭК»³ (табл. 2).

Таблица 2

Добыча угля с предприятиями АО «СУЭК»

Предприятия по добыче угля	2017 г., млн т	Отклонение (+/-) от 2016 г., млн т	Удельный вес, %
АО «СУЭК»	107,8	+2,4	100
В том числе АО «СУЭК-Кузбасс» (Кемеровская обл.)	38,2	+0,5	35,4
Филиал АО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Бородинский имени М.И. Щадова» (Красноярский край)	19,5	+0,5	18,1
АО «Разрез Тугнуйский» (Республика Бурятия)	13,6	-0,4	12,6
ООО «СУЭК-Хакасия» (Республика Хакасия)	8,3	-0,6	7,7
АО «Ургалуголь» (Хабаровский край)	6,6	+1,1	6,1
Другие угледобывающие предприятия АО «СУЭК»	21,6	+1,3	20,1

Источник: составлено авторами на основе [16].

Благоприятная конъюнктура мирового угольного рынка обеспечивает сбыт прироста угледобычи на экспорт. Однако перспективы дальнейшего роста объемов добычи угля как предприятиями АО «СУЭК», так и в России в целом связаны, прежде всего, с инвестиционной привлекательностью отрасли и качественным изменением технико-технологического потенциала производства, внедрением нового высокопроизводительного оборудования и современных технологий, использующих элементы 5–6 технологического укладов (программа «Индустрия 4.0») [12, 26].

Технологический рывок в рамках данной программы позволяет существенно повысить производительность труда и эффективность деятельности угольных предприятий за счет повышения уровня автоматизации и роботизации производственных процессов, начиная от стадии эксплуатации месторождения и заканчивая долгосрочной стратегией развития горнодобывающего предприятия («Умный карьер») [12, с. 44–48]. Так, цифровизация позволила угольным предприятиям внедрить системы мониторинга за работой персонала и самоходного оборудования в режиме реального времени, т.е. регистрировать месторасположение людей и техники, параметры работы двигателей, гидравлической и электрической системы, в том числе самосвалов или погрузчиков с определением весовой нагрузки. В частности, «умный» угольный пласт через «Интернет вещей» «сообщает» исполнительному органу угольного комбайна текущие размеры и прочностные характеристики угольного пласта, наличие и величину нежелательных в нем твердых включений и т.д. На основе этой информации автоматически меняются режим работы комбайна, а также вектор его перемещения. «Разговаривая» в Интернет-сети с транспортной системой, угольный пласт «указывает», по какому маршруту и какими транспортными средствами уголь

³ АО «СУЭК» – Акционерное общество «Сибирская угольная энергетическая компания».

своевременно будет доставлен в пункт назначения. При этом все машины и оборудование, применяемые на горном предприятии, как составные части производственных киберфизических систем могут подавать сигналы об износе их отдельных деталей и формировать через Интернет заказы на их изготовление, доставку и замену.

В свою очередь, благодаря российско-китайскому взаимодействию в рамках энергетического бизнес-форума (ноябрь 2018 г.) прогнозируется рост добычи, переработки, а также потребления ресурсов путем создания совместных предприятий [24].

Будущий технологический импульс, основанный на использовании киберфизических систем, отражает «революцию» в экономике с точки зрения существенного снижения трудоемкости производственных операций, что повышает рыночный потенциал выпускаемой продукции за счет роста энергоэффективности и укрепления конкурентоспособности угольной отрасли. Производственные затраты, в случае применения киберфизических систем, не зависят от масштабов производства. Это предопределяет переход предприятий к децентрализованной модели производства, в которой сбор и обработка информации, а также принятие решений становятся все более автономными, а интеллектуальные программы позволят вырабатывать варианты, которые ранее невозможно было программировать.

К сожалению, не располагая необходимыми статистическими данными об использовании цифровых технологий в угольной промышленности России, приходится ограничиться данными об инновационной деятельности, что косвенно отражает негативную тенденцию снижения удельного веса используемых новых технико-технологических решений в промышленности России (рис. 2).

Уровень инновационной активности в промышленности России в 2017 г. оказался в 6 раз меньше, чем в Германии, Финляндии и Великобритании. По показателю внедрения промышленных роботов со значением 3–4 робота на 10 000 человек Россия также отстает от мирового уровня, где его



Рис. 2. Удельный вес инновационных промышленных предприятий в общем числе технологических инноваций в 2000–2016 гг.

Источник: составлено авторами на основе [7]

среднее количество достигло 85, а в Германии, Сингапуре и Южной Корее колеблется от 300 до 700 и более [3, 21].

В угольной промышленности РФ ситуация еще более критичная. Несмотря на возросший общий объем инвестиций в основной капитал предприятий угольной промышленности (в 2017 г. более 100 млрд руб.) и прирост производственных мощностей (7 млн т н.э. в год), только 2,1 % предприятий внедряют технологические инновации [16, 31, с. 2–3]. Как следствие, по предварительным оценкам, более 60 % предприятий добывающей промышленности находятся на уровне полуавтоматизированных или на этапе перехода к автоматизированному производству (третий-четвертый технологические уклады).

Для угольной промышленности России реализация программы «Индустрия-4.0» [13] позволит обеспечить условия для применения так называемых бесплюдных технологий добычи угля, но и требует перехода к другим пространственно-планировочным решениям, основанным на внедрении системы «автономных производственно-технологических блоков» небольшой мощности, что в совокупности отражает производственную систему современной шахты или разреза [22].

Несмотря на то, что основная часть угольной промышленности находится на начальном этапе внедрения передовых технологий, некоторые предприятия уже стали лидерами. Так, в 2015 г. белорусский производитель карьерной техники представил первый беспилотный карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513R грузоподъемностью 130 т для использования в АО «СУЭК» крупнейшему добытчику угля в Российской Федерации [23].

Два роботизированных «БЕЛАЗа» будут работать в Абаканском разрезе (Хакасия, РФ) в связке с роботизированным экскаватором производства «Уралмаш». Робототехника пока не может быть встроена в обычный рабочий процесс, поэтому для трех «роботов» создан специальный экспериментальный участок.

Создание роботизированного самосвала стало возможным благодаря тесному и плодотворному сотрудничеству производителя карьерной техники и АО «ВИСТ Групп» – международной компании в области разработки и внедрения информационных технологий для горнодобывающей промышленности и металлургии. Роботизация горнодобычи – перспективное направление. Поэтому к карьерникам-роботам уже проявляют повышенный интерес на Кольском полуострове, в Чили и Перу, т.е. там, где человеку работать небезопасно.

Запуск роботизированной техники в условиях реального карьера требует соответствующей инфраструктуры, совершенно иной, нежели в «обычном» карьере, особой системы диспетчеризации и др. Для оценки технико-технологической и экономической эффективности перехода на роботизированную добычу угля открытым способом с использованием существующих математических методов и инструментов в качестве примера рассмотрен «интеллектуальный» (умный) карьер⁴ [25].

⁴ Проект ССГПО (Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение) «Умный карьер» признан лучшим по итогам отраслевого конкурса «Золотой Гефест» в 2018 г.

Анализ работы действующих карьеров позволяет представить укрупненно основные производственные процессы организации добычи полезных ископаемых открытым способом и выделить главные машины и механизмы [6, 18], которые в дальнейшем будут автоматизированы и роботизированы (рис. 3).



Рис. 3. Основные технологические процессы добычи полезных ископаемых открытым способом. Пунктиром обозначены процессы, которые могут отсутствовать в зависимости от вида карьера
Источник: составлено авторами на основе [6, 18]

Так, для вскрышивания применяются выемочно-погрузочные механизмы: экскаватор, бульдозер, драглайнер, мехлопата, а для буровзрывных работ – буровые станки и установки. Основными видами транспорта могут служить автосамосвалы, железнодорожный транспорт (думпкар) и ленточный конвейер.

Следовательно, основными машинами технологической цепочки добычи полезных ископаемых открытым способом является связка «экскаватор – самосвал – бульдозер», предназначенная для зачерпывания (экскавации) горной массы, перемещения ее на относительно небольшие расстояния и погрузка на транспортные средства или в отвал [5, 18]. Также при добыче полезных ископаемых открытым способом следует выделить функцию горного диспетчера, непосредственно управляющего всем парком технологического оборудования карьера.

Обзор информации о состоянии горнодобывающей промышленности позволяет выявить техническое противоречие, которое заключается в следующем. Для обеспечения конкурентоспособности и рентабельности предприятия необходимо повышение производительности труда. С другой стороны, требуется обеспечить безопасность производства. Поэтому внедрение безлюдных технологий и автоматизация управления горнотранспортным комплексом и промышленной безопасностью (проект «Интеллектуальный карьер») является одним из важнейших факторов повышения

производительности труда с одновременной гарантией безопасности на открытых горных работах [4].

В общую схему автоматизации и роботизации на открытых горных работах проекта «Интеллектуальный карьер» входит автономно (дистанционно) управляемая техника горнодобывающего комплекса, способная выполнять свои функции полностью или частично без участия человека. При этом пространственное положение горной техники определяется с помощью спутниковой навигации (GPS/Глонасс), а функционал программного обеспечения позволяет оперативно управлять работой всех машин технологической цепочки добычи полезных ископаемых в карьере.

Первым этапом определения структурного сдвига технологического уклада (ТУ) открытого способа добычи угля является вычисление номера ТУ, соответствующего основным машинам и механизмам «обычного» и «интеллектуального» карьера.

С нашей точки зрения, определение ТУ производственных технологических процессов непосредственно на предприятии с учетом разного рода неопределенности, неконтрастности, неполноты и неточности экзогенных параметров в моделях технологических процессов возможно с применением аппарата теории нечетких множеств и методов нечетких вычислений [1, 9, 19].

Определим нечеткое множество \tilde{A} на универсальном множестве U (представляющее номера ТУ) как совокупность пар $\mu_A(u)$, u , где $\mu_A(u)$ – степень принадлежности элемента $u \in U$ к нечеткому множеству \tilde{A} .

В нашем случае универсальное множество U состоит из конечного количества элементов $U = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, которые соответствуют номеру ТУ $u_1 = T.Y. - 3$, $u_2 = T.Y. - 4$, $u_3 = T.Y. - 5$, $u_4 = T.Y. - 6$. Следовательно, нечеткое множество \tilde{A} можно представить в виде:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i) / u_i, \quad (1)$$

где $k = \overline{1, 4}$, $\mu_A(u_i) \in [0; 1]$.

Наиболее важным этапом нечеткой формализации данной задачи является задание функций принадлежности (в нашем случае – степень выраженности) для нечеткого множества, определяющих термы лингвистических переменных задачи.

В качестве лингвистических переменных нечеткого множества целесообразно взять основные добывающие машины и механизмы «обычного» и «интеллектуального» карьера (экскаватор, самосвал, бульдозер, диспетчер, спутник GPS/Глонасс). А множество всех возможных значений лингвистической переменной (терм-множество), соответственно: $X1$ – не выражен ($\mu = 0$); $X2$ – очень слабо выражен ($\mu = 0,1$); $X3$ – слабо выражен ($\mu = 0,25$); $X4$ – средне выражен ($\mu = 0,5$); $X5$ – сильно выражен ($\mu = 0,75$); $X6$ – очень сильно выражен ($\mu = 0,9$); $X7$ – полностью выражен ($\mu = 1$).

Для определения степени выраженности (принадлежности) $\mu(u)$ целесообразно применить метод семантической дифференциации, предложенный Осгудом [32], включающий следующие этапы:

– характеристика набора свойств, анализируемых при оценивании;

– определение степени выраженности позитивного свойства анализируемого объекта в рамках используемой шкалы с приданием оценки соответствующего числового значения.

Используя системную классификацию технико-экономического развития [5, 10], для определения степени выраженности $\mu(u)$ в нечетком множестве, соответствующего основным добывающим машинам и механизмам «обычного» и «интеллектуального» карьера, выделим основные составляющие технологического оборудования (табл. 3).

Таблица 3

Главные устройства и оборудование основных добывающих машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера

Машины и механизмы	«Обычный» карьер	«Интеллектуальный» карьер
Экскаватор	Электродвигатели постоянного и переменного тока; высоковольтное распределительное устройство; трансформатор; шкаф управления (силовая полупроводниковая техника); редуктор; компрессорная установка; поворотная платформа; ходовая тележка (гусеничные рамы и цепи)	GPS/Глонасс антенна; устройство передачи данных WiFi; камеры; лидары; радары; контроллер; электронные датчики (положения ковша и т.д.)
Самосвал	Гибридная силовая установка (дизельный двигатель, электрогенератор, тяговые электродвигатели, электрические дифференциалы); рама; подвеска (пневмогидравлический цилиндр); гидравлическая система выгрузки;	GPS/Глонасс антенна; устройство передачи данных WiFi; камеры; лидары; радары; контроллер; электронные датчики (веса, давления, уклона, инклинометр, работы двигателя под нагрузкой, уровня топлива и т.д.); блок сбора данных
Бульдозер	система контроля (блок управления, электронные датчики); гидромеханическая трансмиссия; электрогидравлическое управление; защита от перекосов отвала (электронные датчики); гусеничная тележка	
Диспетчер	Средства коммуникаций и связи; системы телемеханики; пульт с мнемосхемой; вычислительная техника	Локальная сеть (кластер сервера); беспроводная система передачи данных и управляющих воздействий
Спутник GPS/Глонасс	–	Гермоконтейнер; бортовой компьютер; приборный блок; антенно-фидерные устройства; система ориентации и терморегулирования; электродвигатели; панели солнечных батарей; приемник и передатчик навигационной информации; блок управления

Источник: составлено авторами на основе [4, 6, 17, 28].

Таким образом получены числовые характеристики $\mu(u)$, обусловленные системной классификацией технико-экономического развития для основных добывающих машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера [4, 17, 28] (рис. 4).

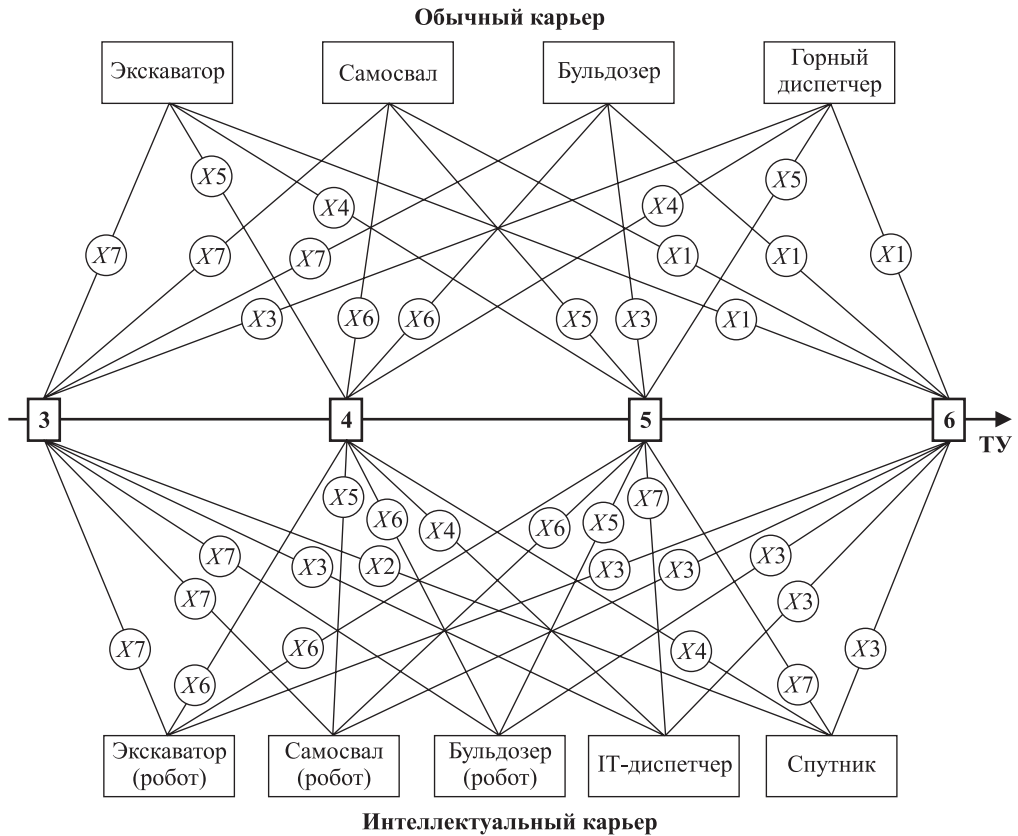


Рис. 4. Значения функции принадлежности $\mu(u)$, соответствующие степени выраженности основных добывающих машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера, относительно номера ТУ

Источник: собственная разработка авторов на основе [1, 6, 9, 18, 19]

Используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, для получения количественных значений каждой выходной переменной определяется дефаззификация по методу центра тяжести (взвешенного среднего) [1, 9]:

$$T.U. \text{ (механизма)} = \frac{\sum_{i=1}^k u_i \cdot \mu_A(u_i)}{\sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)}, \quad (2)$$

где $k = \overline{1, 4}$, $\mu_A(u_i) \in [0; 1]$.

Оценка технологических укладов главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера рассчитана согласно (1)–(2) (табл. 4). Дробные числа, полученные при оценке ТУ, объясняются тем, что в каждом процессе участвуют несколько технологических укладов.

Предложенная методика расчета, основанная на использовании математического аппарата теории нечетких множеств, позволяет обосновать и оценить динамику увеличения технологических укладов главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера (рис. 5).

Таблица 4

**Оценка номера технологического уклада главных машин и механизмов
«обычного» и «интеллектуального» карьера**

Машины и механизмы	Вид (структура) карьера	Таблица соответствия нечеткого множества и функции принадлежности					ТУ механизм
		u_i	u_1	u_2	u_3	u_4	
Экскаватор	«Обычный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X5	X4	X1	3,78
	«Интеллектуальный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X6	X6	X3	4,13
Самосвал	«Обычный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X6	X5	X1	3,91
	«Интеллектуальный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X5	X6	X3	4,14
Бульдозер	«Обычный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X6	X3	X1	3,65
	«Интеллектуальный»	$\mu_A(u_i)$	X7	X6	X5	X3	4,09
Диспетчер	Горный	$\mu_A(u_i)$	X3	X4	X5	X1	4,33
	IT-диспетчер	$\mu_A(u_i)$	X3	X4	X7	X3	4,63
Спутник GPS/Глонасс	«Интеллектуальный»	$\mu_A(u_i)$	X2	X4	X7	X3	4,76

Источник: собственная разработка авторов на основе [4, 6, 19].

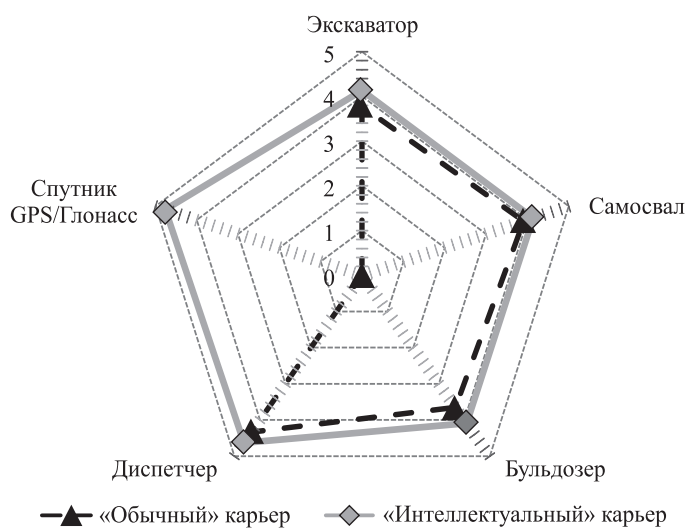


Рис. 5. Числовые характеристики технологических укладов главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера

Источник: собственная разработка авторов на основе [4, 6, 19]

Оценку существенности уровня структурных сдвигов технологических укладов главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера целесообразно провести с использованием индекса Рябцева [14]:

$$I_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i^1 - d_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i^1 + d_i^0)^2}}, \quad (3)$$

где $n = \overline{1, 5}$, d_i^1, d_i^0 – номера ТУ главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера.

Согласно рассчитанным данным (табл. 4), индекс В.М. Рябцева (3) принимает значение $I_R = 0,2822$. Полученный коэффициент применительно к шкале оценки меры существенности структурных различий можно интерпретировать как индекс, расположенный между существенным и значительным различием структур.

Данный подход является универсальным, но не реагирует на происходящие процессы во взаимосвязи с внутренней динамикой, а поэтому нуждается в соответствующей корректировке.

Кроме того, потенциал структурного сдвига при трансформации от «обычного» до «интеллектуального» способа добычи угля может изменяться от прогрессивного на начальном этапе до противоположного – инерционного. При этом масса и инерция, характеризующие динамику процесса, способного развиваться в определенном направлении, отражают некоторую консервативность структурной трансформации. А это требует качественно новых подходов, включающих как индивидуальные, так и обобщающие характеристики свойств одной структуры с учетом асимметричности, вариации и форм распределения через обобщающие индексы сравнения нескольких структур [11, 15, 20, 27].

В качестве обоснования измерения структурного сдвига, наиболее подходящего к условиям данного исследования, целесообразно ввести сводный индекс роста (I) как отношение среднеквадратических отклонений, полученных при оценке номера технологического уклада главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера. При этом номера ТУ главных машин и механизмов d_i^1, d_i^0 (табл. 4) выражаются через процентное отношение в составе ТУ.

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{d}_i^1)^2}{n}} \div \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\tilde{d}_i^0)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где $n = \overline{1, 5}$, $\tilde{d}_i^1, \tilde{d}_i^0$ – процентное отношение номеров ТУ главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера.

Обоснование структурной динамики выполнено с использованием коэффициента структурной эластичности (E), который является сводным показателем, характеризующим динамику структурных сдвигов. Структурная эластичность определяется как отношение инерционного (N_1) к инновационному (N_2) компоненту ($E = N_1 \div N_2$), а структурное опережение $N_2 -$

как произведение индекса структурного сдвига на его массу ($N_2 = I \cdot M$), где $M = \frac{1}{2} \cdot \Sigma(\tilde{d}_i^1 - \tilde{d}_i^0)$ – структурная масса сдвига).

Структурное запаздывание N_1 представляет собой разность между нормой роста и структурным опережением ($N_1 = I' - N_2$, где $I' = I - 100$ – норма роста).

В соответствии с данными табл. 4 рассчитаны индексы структурного «скачка» между технологическими укладами главных машин и механизмов «обычного» и «интеллектуального» карьера (табл. 5).

Таблица 5

Расчет индексов структурного «скачка» между технологическими укладами «обычного» и «интеллектуального» карьера

Показатель	Числовое значение
Сводный индекс роста (I), %	144,8
Норма роста (I), %	44,8
Масса структурного сдвига (M), %	51,25
Структурное опережение (N_2), %	74,25
Структурное запаздывание (N_1), %	-29,45
Структурная эластичность (E)	-0,4
Направленность	+

Источник: собственный расчет авторов на основе (4).

Данные табл. 5 отражают положительную динамику структурных сдвигов и нормы роста технологического уклада: показатель структурного опережения вдвое больше структурного запаздывания. Отрицательное значение коэффициента структурной эластичности свидетельствует о процессе компенсирующего замещения, когда вытеснение технологий «обычного» способа добычи угля инновационными технологиями «интеллектуального» карьера приводит к перестройке технико-технологической базы не только отдельного предприятия, но и отрасли в целом, что способствует росту новых возможностей экономического развития. В первую очередь необходимо отметить, что главным условием социально-экономического развития является оптимальное сочетание положительных структурных сдвигов с экономическим ростом.

Полученный показатель структурной эластичности $E = -0,4$ принадлежит интервалу $(-1; 1)$, который называется коридором структурного роста. Данному множеству значений E свойственны структурные сдвиги, характерные для инновационного развития [7].

Итак, «умный» карьер, где будут обеспечиваться автоматическая диспетчеризация роботизированной техники, интеллектуальное дистанционное управление с элементами автономности, универсальная система управления автономных самосвалов, способен полностью отказаться от работы в опасных зонах без увеличения коэффициента вскрыши в обвалоопасных зонах. Одновременно возрастут коэффициенты технологической готовности и показатель использования автосамосвалов и экскаваторов (+25 %).

Для расчета экономической эффективности внедрения автоматизированной системы «интеллектуальный» карьер⁵ целесообразно использовать методику [1], предложенную разработчиком программы, с помощью следующих показателей:

– повышение производительности работы самосвалов на 15–20 % за счет уменьшения количества простоев, изменения технологического процесса смены – устранения простоев, связанных с человеческим фактором (обед, пересменка);

– уменьшение затрат на технологическое обслуживание и ремонты на 15–20 % за счет более бережной эксплуатации техники;

– сокращение численности производственного персонала в зоне непосредственного ведения горных работ, сокращение численности ремонтного персонала. Один оператор в диспетчерском центре может контролировать движение 4–10 самосвалов. Машинисты погрузочной техники переводятся в современный диспетчерский центр и работают под непосредственным руководством горных инженеров;

– появляется возможность не строить социальную инфраструктуру для линейного персонала открытых горных работ, а вести работу из удаленных диспетчерских центров, расположенных в административных центрах с развитой социальной инфраструктурой [1, с. 112–113].

В результате совокупный эффект за пять лет эксплуатации при условии, что суммарный объем добычи разреза не изменится, составит 155 млн руб., в основном за счет экономии фонда заработной платы с начислениями, а дисконтированный срок окупаемости инвестиций оказывается в пределах трех лет.

Литература

1. *Аверишина Д.В.* Оценка экономической эффективности внедрения автоматизированной системы «интеллектуальный карьер» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S2. С. 111–117.
2. *Алтунин А.Е., Семухин М.В.* Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. Тюмень: Издательство Тюменского гос. ун-та, 2000. 352 с.
3. Аналитический обзор мирового рынка робототехники // Лаборатория робототехники СберБанка. Апрель 2018. 79 с.
4. *Владимиров Д.Я.* Интеллектуальный карьер: эволюция или революция // Открытые горные работы в XXI веке. 2016. № 12. С. 50–55.
5. *Глазьев С.Ю.* Новый технологический уклад в современной мировой экономике // Международная экономика. 2010. № 5. С. 5–27.
6. Горная энциклопедия: В 5 т. / гл. ред. Е.А. Козловский. М.: Сов. энцикл., 1984–1991.
7. *Городникова Н.В., Гохберг Л.М., Дитковский К.А. и др.* Индикаторы инновационной деятельности: 2018: статистический сборник. М.: НИУ ВШЭ, 2018. 344 с.
8. *Дедов Л.А., Боткин О.И.* Индексный макроструктурный анализ экономической динамики. Основные понятия и приемы макроструктурного анализа. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 111 с.

⁵ Для примера расчета выбран разрез Тугнуйский как лучшее предприятие с отлаженным производственным процессом, высоким объемом добычи – более 10 млн т угля в год (2017 г.), использующий современное технологическое оборудование.

9. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 81 с.
10. Кириллова О.Г. Технологический уклад как интегрирующий показатель модернизации и опережающего развития российской экономики // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2014. № 2 (34). С. 45–49.
11. Красильников О.Ю. Структурные сдвиги в экономике. Саратов: СГУ, 2001. 183 с.
12. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С. Мировой инновационный проект «Индустрия-4.0» – возможности применения в угольной отрасли России // Уголь. Октябрь, 2017. С. 44–50.
13. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С. Программы «Индустрия-4.0» и «Цифровая экономика Российской Федерации» – возможности и перспективы в угольной промышленности // Горная промышленность. 2018. № 1 (137). С. 22–28.
14. Региональная статистика: Учебник / под ред. В.М. Рябцева, Г.И. Чудилина. М., 2001. 380 с.
15. Сухарев О.С. К разработке комплексной методики анализа структурных сдвигов в национальной экономике // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 13 (202). С. 56–64.
16. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2017 года // Уголь. 2018. № 3. С. 58–73.
17. Трубецкой К.Н., Рьльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А. Научно-технические вопросы изменения организации управления открытыми горными работами с применением роботизированной карьерной техники // Горная промышленность. 2017. № 5 (135). С. 27–30.
18. Уголь мира / под общ. ред. Л.А. Пучкова. М.: Издательство «Горная книга», 2013. Т. III: Уголь Евразии. 752 с.
19. Шелегеда Б.Г., Шарнопольская О.Н., Руссиян С.А., Логачева О.М., Погоржельская Н.В. Особенности методики расчета интегральной оценки технологических укладов на предприятиях угольной промышленности // Вестник НГУЭУ. 2017. № 2. С. 221–234.
20. BP Statistical Review of World Energy // London SW1Y 4PD. June 2018. P. 56.
21. Which Nations Really Lead in Industrial Robot Adoption? // Information technology & innovation foundation. November 2018. P. 1–10.
22. Аптекман А., Калабин В., Клиңцов В., Кузнецова Е., Кулагин В., Ясеновец И. Цифровая Россия: новая реальность // Digital McKinsey. Июль 2017. 133 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tadviser.ru/images/c/c2/Digital-Russia-report.pdf> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
23. Беспилотные карьерные самосвалы БЕЛАЗ отправятся в СУЭК // Официальный сайт Холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tadviser.ru/images/c/c2/Digital-Russia-report.pdf> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
24. В Пекине прошел первый Российско-китайский энергетический бизнес-форум // Официальный сайт РОСНЕФТЬ, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gosneft.ru/press/today/item/193085/> (дата обращения: 27.02.2019 г.).
25. Проект ССПО «Умный карьер» признан лучшим по итогам отраслевого конкурса «Золотой Гефест» // Официальный сайт Eurasian Resources Group 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.erg.kz/ru/news/981> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
26. Рагимова С. Цифровая Индустрия 4.0 // Официальный сайт «Forbes». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
27. Развадовская Ю.В., Шевченко И.К. Анализ структурно-динамической интенсивности развития отраслей промышленного сектора экономики // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4/2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1287> (дата обращения: 17.02.2019 г.).

28. Спецтехника // Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <http://tpscom.ru/> (дата обращения: 15.02.2019 г.).
29. Статистический Ежегодник мировой энергетики 2018 // Официальный сайт «Ежегодник Enerdata». [Электронный ресурс]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/coal-lignite/coal-world-consumption-data.html> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
30. Стенограмма заседания Комиссии по вопросам стратегии развития ТЭК и экологической безопасности 27 августа 2018 года // Офиц. сайт Администрации Президента России. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/councils/by-council/29/58382> (дата обращения: 17.02.2019 г.).
31. Фридлянова С.Ю. Инновации в России: динамика основных показателей // Наука. Технологии. Инновации. НИУ ВШЭ, 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://issek.hse.ru/data/2018/09/26/1153998102/NTI_N_103_26092018.pdf (дата обращения: 17.02.2019 г.).
32. Osgood Ch.E., Tannenbaum P.H. The Principle of Congruity in the Prediction of Attitude Change // Psychological Review. 1955. Vol. 62.

Bibliography

1. Avershina D.V. Ocenka jekonomicheskoy jeffektivnosti vnedrenija avtomatizirovannoj sistemy «intellektual'nyj kar'er» // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2013. № S2. P. 111–117.
2. Altunin A.E., Semuhin M.V. Modeli i algoritmy prinjatija reshenij v nechetkih uslovijah: Monografija. Tjumen': Izdatel'stvo Tjumenskogo gos. un-ta, 2000. 352 p.
3. Analiticheskij obzor mirovogo rynka robototehniki // Laboratorija robototehniki SberBanka. Aprel' 2018. 79 p.
4. Vladimirov D.Ja. Intellectual'nyj kar'er: jevoljucija ili revoljucija // Otkrytye gornye raboty v XXI veke. 2016. № 12. P. 50–55.
5. Glaz'ev S.Ju. Novyj tehnologicheskij uklad v sovremennoj mirovoj jekonomike // Mezhdunarodnaja jekonomika. 2010. № 5. P. 5–27.
6. Gornaja jenciklopedija: V 5 t. / gl. red. E.A. Kozlovskij. M.: Sov. jencikl., 1984–1991.
7. Gorodnikova N.V., Gohberg L.M., Ditkovskij K.A. i dr. Indikatory innovacionnoj dejatel'nosti: 2018: statisticheskij sbornik. M.: NIU VShJe, 2018. 344 p.
8. Dedov L.A., Botkin O.I. Indeksnyj makrostrukturnyj analiz jekonomicheskoy dinamiki. Osnovnye ponjatija i priemy makrostrukturnogo analiza. Ekaterinburg: UrO RAN, 2013. 111 p.
9. Demidova G.L., Lukichev D.V. Reguljatory na osnove nechetkoj logiki v sistemah upravlenija tehničeskimi ob#ektami. SPb.: Universitet ITMO, 2017. 81 p.
10. Kirillova O.G. Tehnologicheskij uklad kak integrirujushhij pokazatel' modernizacii i operezhajushhego razvitija rossijskoj jekonomiki // Vestnik Altajskoj akademii jekonomiki i prava. 2014. № 2 (34). P. 45–49.
11. Krasil'nikov O.Ju. Strukturnye sdvigi v jekonomike. Saratov: SGU, 2001. 183 p.
12. Plakitkin Ju.A., Plakitkina L.S. Mirovoj innovacionnyj projekt «Industrija-4.0» – vozmozhnosti primenenija v ugol'noj otrasli Rossii // Ugol'. Oktjabr', 2017. P. 44–50.
13. Plakitkin Ju.A., Plakitkina L.S. Programmy «Industrija-4.0» i «Cifrovaja jekonomika Rossijskoj Federacii» – vozmozhnosti i perspektivy v ugol'noj promyshlennosti // Gornaja promyshlennost'. 2018. № 1 (137). P. 22–28.
14. Regional'naja statistika: Uchebnik / pod red. V.M. Rjabceva, G.I. Chudilina. M., 2001. 380 p.
15. Suharev O.S. K razrabotke kompleksnoj metodiki analiza strukturnyh sdvigov v nacional'noj jekonomike // Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'. 2013. № 13 (202). P. 56–64.
16. Tarazanov I.G. Itogi raboty ugol'noj promyshlennosti Rossii za janvar'–dekabr' 2017 goda // Ugol'. 2018. № 3. P. 58–73.

17. *Trubeckoj K.N., Ryl'nikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A.* Nauchno-tehnicheskie voprosy izmenenija organizacii upravlenija otkrytymi gornymi rabotami s primeneniem robotizirovannoj kar'ernoj tehniki // *Gornaja promyshlennost'*. 2017. № 5 (135). P. 27–30.
18. *Ugol' mira / pod obshh. red. L.A. Puchkova.* M.: Izdatel'stvo «Gornaja kniga», 2013. T. III: *Ugol' Evrazii*. 752 p.
19. *Shelegeda B.G., Sharnopol'skaja O.N., Russijan S.A., Logachjova O.M., Pogorzhel'skaja N.V.* Osobennosti metodiki raschjota integral'noj ocenki tehnologicheskikh ukladov na predpriyatijah ugol'noj promyshlennosti // *Vestnik NGUJeU*. 2017. № 2. P. 221–234.
20. BP Statistical Review of World Energy // London SW1Y 4PD. June 2018. P. 56.
21. Which Nations Really Lead in Industrial Robot Adoption? // Information technology & innovation foundation. November 2018. P. 1–10.
22. *Aptekman A., Kalabin V., Klinov V., Kuznecova E., Kulagin V., Jasenovec I.* Cifrovaja Rossija: novaja real'nost' // *Digital McKinsey*. Ijul' 2017. 133 p. [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.tadviser.ru/images/c/c2/Digital-Russia-report.pdf> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
23. *Bespilotnye kar'ernye samosvaly BELAZ otpravjatsja v SUJeK* // Oficial'nyj sajt Holdinga «BELAZ-HOLDING». [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.tadviser.ru/images/c/c2/Digital-Russia-report.pdf> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
24. V Pekine proshel pervyj Rossijsko-kitajskij jenergeticheskij biznes-forum // Oficial'nyj sajt ROSNEFT", 2019. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.rosneft.ru/press/today/item/193085/> (data obrashhenija: 27.02.2019 g.).
25. *Proekt SSGPO «Umnyj kar'er» priznan luchshim po itogam otraslevogo konkursa «Zolotoj Gefest»* // Oficial'nyj sajt Eurasian Resources Group 2019. [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://www.erg.kz/ru/news/981> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
26. *Ragimova S.* Cifrovaja Industrija 4.0 // Oficial'nyj sajt «Forbes». [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
27. *Razvadovskaja Ju.V., Shevchenko I.K.* Analiz strukturno-dinamicheskoj intensivnosti razvitija otraslej promyshlennogo sektora jekonomiki // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2012. № 4/2. [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1287> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
28. *Spectehnika* // Oficial'nyj sajt. [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://tpscom.ru/> (data obrashhenija: 15.02.2019 g.).
29. *Statisticheskij Ezhegodnik mirovoj jenergetiki 2018* // Oficial'nyj sajt «Ezhegodnik Enerdata». [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/coal-lignite/coal-world-consumption-data.html> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
30. *Stenogramma zasedanija Komissii po voprosam strategii razvitija TJeK i jekologicheskij bezopasnosti 27 avgusta 2018 goda* // Ofic. sajt Administracii Prezidenta Rossii. [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/councils/by-council/29/58382> (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
31. *Fridljanova S.Ju.* Innovacii v Rossii: dinamika osnovnyh pokazatelej // *Nauka. Tehnologii. Innovacii*. NIU VShJe, 2018. [Jelektronnyj resurs]. URL: https://issek.hse.ru/data/2018/09/26/1153998102/NTI_N_103_26092018.pdf.pdf (data obrashhenija: 17.02.2019 g.).
32. *Osgood Ch.E., Tannenbaum P.H.* The Principle of Congruity in the Prediction of Attitude Change // *Psychological Review*. 1955. Vol. 62.