

DOI:

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕТАДААННЫХ МНОГОЧИСЛЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ И ИННОВАЦИОННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ УНИВЕРСИТЕТА

Краснов А.Е., Пивнева С.В.

*Российский Государственный Социальный Университет, Россия, г. Москва
ул. В. Пика д.4*

krasnovmgutu@yandex.ru, tlt-swetlana@yandex.ru

Аннотация: В статье рассмотрен подход к формированию численных значений метаданных, формируемых на основе метода семантической декомпозиции многочисленных показателей, характеризующих научно-исследовательскую и инновационную деятельность университета, а также их объединения на основе метода иерархического квази-нейросетевого агрегирования. Разработанные методы необходимы для мониторинга состояния научно-инновационной деятельности университета, как первого шага при построении системы ее управления.

Ключевые слова: квази-нейросетевое агрегирование, численные значения метаданных, мониторинг научно-инновационной деятельности университета.

Введение

Любой университет, реализующий программу высшего образования, по своей организации и видам деятельности относится к сложным организационным системам (Pinheiro, 2017). В настоящее время описание и исследование сложных систем, оперирующих большими данными, производят на основе методов АНР (Analytic Hierarchy Process): анализа (декомпозиции) и последующего синтеза (агрегирования) их иерархических сущностей (for decision making, planning, conflict resolution and in neural synthesis) (Saaty, 2008).

Однако, как показала практика, даже при наличии сбалансированной системы показателей (организаций и вузов) формальные методы декомпозиции и агрегирования данных отсутствуют (Karathanos, 2005).

В теории систем для агрегирования широко используют методы линейных и нелинейных преобразований их фазовых векторов, а также аппарат теории непрерывных групп, позволяющие снизить размерность описания как статических систем, например, в задачах кластеризации и распознавания образов (Gonzalez, 2016), так и динамических систем, например, в задачах управления и идентификации (Pavlovskij, 1984; Curkov, 1988).

Следует отметить, что, несмотря на развитый математический аппарат, как для АНР (Saaty, 1986), так и для агрегирования динамических систем (Curkov, 1988), соответствующие методы декомпозиции и агрегирования являются достаточно сложными. Важным также является и то обстоятельство, что во многих случаях нельзя ввести отношения доминирования отдельных показателей научно-инновационной деятельности университета. Поэтому в работе (Krasnov, 2013) была заложена основа более простых методов декомпозиции объектов технологий, производства и бизнеса на основе стандарта IDEF (Šerifi1, 2009) и иерархического агрегирования декомпозированных сущностей на основе квази-нейросетевой технологии. Этот подход был развит в работе (Krasnov, A., Pivneva, S, 2021).

Целью настоящей работы является развитие метода иерархического агрегирования данных на основе их представления в виде квази-нейросетевой структуры, входом в которую являются сами данные, а выходом – совокупность метаданных или индикаторов состояния научно-исследовательской и инновационной деятельности университета, характеризующая степень соответствия данных плановым критериальным показателям.

Впервые идея использования собственного вектора для решения так называемой задачи о лидере известна из работы К. Бержа, предложившего ее для обработки простых структур (Berzh, 1962).

Независимо друг от друга Б. Брук, В. Бурков в СССР (Bruk, 1972) и Т. Саати в США (Saaty, 1972) предложили модель иерархического упорядочения отношений между различными данными. Т. Саати и его последователи развили идею использования собственного вектора в качестве вектора приоритетов в мощную методологию системного анализа иерархических структур.

Методу анализа иерархий посвящены специальные выпуски двух журналов (Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 20, No 6, 1986 и International Journal on Mathematical Modelling, Vol. 9, № 3–5, 1987). В 1986 г. вышли два обзора, в которых приводятся данные по большинству из работ, опубликованных к тому времени по МАИ (Zahedi, 1986; Xu, 1986). Число статей прикладного характера

с решениями задач из разных областей на основе МАИ измеряется тысячами. Начиная с 1988 г. (раз в два года) проводится Международный симпозиум, посвященный МАИ (International Symposium on Analytic Hierarchy Process, ISANP).

Аксиоматическое обоснование метода анализа иерархий впервые было дано в работе (Saaty, 1986), где приведен ряд общих теорем, определяющих операционные возможности МАИ, показывающих удобства парных сравнений и метода собственного вектора при оценке отношений, а также исследована устойчивость собственного вектора к малым возмущениям в данных.

Саати и Варгам в (Saaty, 1986) исследовали интервальные оценки моделированием в предположении, что все точки интервала распределены равномерно. Используя тест Колмогорова–Смирнова, они показали, что компоненты собственного вектора удовлетворяют усеченному нормальному распределению. Была подтверждена возможность распространения центральной теоремы на распределение компонент собственного вектора как предельных средних значений доминирования каждой альтернативы над другими альтернативами по путям всех длин. Было показано, каким образом выбираются альтернативы в соответствии с произведением их приоритетов.

Применение МАИ при неопределенности, связанной с суждениями в виде нечетких чисел, рассмотрено в (Van Laathoven, 1983; Buckley, 1985).

Фундаментальная шкала измерения результатов парных сравнений, используемая в МАИ, была получена на основе базовых соотношений модели нервного возбуждения, которые приводят к известному психофизиологическому закону «стимул-реакция». Эффективность этой шкалы была проверена во многих приложениях (см., например, (Ishizaka, 2009; Saaty, 2015) и указанные там ссылки).

В нашем исследовании мы целиком заимствуем идеи Саати о парном сравнении объектов (Saaty, 1986), использовании усеченного нормального распределения параметров объектов (Saaty, 1986), а также – психофизический закон «стимул-реакция» (Saaty, 2008; Saaty, 2015), которые привели нас к использованию квази-нейросетевого подхода при агрегировании данных.

Следует отметить, что в системе образования модель Саати не получила широкого практического распространения по сравнению с другими приложениями. Тем не менее, существуют подходы к адаптации университетов и высшего образования в целом на основе теории сложных систем, особенно критических выводов из исследования сложности, где могут быть использованы АНР (Pinheiro, 2017). С этих позиций в (Dos Santos, 2019) проводится систематический обзор литературы по поддержке процесса аналитической иерархии для принятия решений в целях устойчивого развития, что позволяет выявить пробелы и пути будущих исследований. В (Jayakumar, 2017) рассматривается применение АНР для выбора лучшего иностранного университета на основе многих критериев с точки зрения студентов. В (Konin, 2019) рассмотрены проблемы управления современным российским университетом и обоснована необходимость обеспечения центральной роли бизнес-процессов на основе методы системного, проблемного, структурно-функционального и логического анализа. В (Palomares-Montero, 2011) сделана попытка определить, какие из показателей являются наиболее важными для оценки высших учебных заведений, поскольку в настоящее время нет единого мнения по этому вопросу. Была использована техника Delphi, чтобы достичь определенного консенсуса среди группы экспертов, занимающих высшие академические и управленческие должности в испанской системе высшего образования. В (Ferretti, 2018) был определен ряд проблем, которые могут способствовать обсуждению разработки индикаторов, например, таких, как «Превосходство исследований в науке и технике», которые нуждаются в серьезном пересмотре для исследовательской политики в ЕС.

Существует ряд работ, посвященных наиболее общим вопросам преобразования многочисленных показателей и индикаторов в, так называемые, рейтинги. Так, в (Kühne, 2014) было изучено, как механизмы мотивации на основе рейтингов могут гарантировать качество структурированных знаний, созданных совместно. Справочник (Handbook on Constructing Composite Indicators, 2008) представляет собой руководство по построению и использованию составных индикаторов для политиков, ученых, средств массовой информации и других заинтересованных сторон. Несмотря на то, что существует несколько типов составных показателей, настоящее руководство посвящено тем, которые сравнивают и ранжируют показатели страны в таких областях, как конкурентоспособность промышленности, устойчивое развитие, глобализация и инновации.

В работе (Hoornweg, 2007) рассматривают логику построения цепочки понятий «raw data – statistics – indicators – indexes» для управления развитием города. При этом индексы строят как взвешенные комбинации показателей и обычно используют для описания общей производительности.

Достаточно сложные для понимания механизмы формирования специальных рейтингов рассмотрены в (Qiu, 2019; Foster, 2019). В этих статьях представлены рейтинговые механизмы для оценки поведения, позволяющие улучшить здоровье и устойчивость краудсорсинговой платформы.

С 2004 года среди университетов QS World University Rankings стали самым популярным в мире источником сравнительных данных об эффективности университетов. Так, например, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Россия) занял 84 место в иерархии ранжирования QS (QS, 2020). В связи с этим в российском образовании, а также в бывших республиках СССР стали широко использоваться методы упорядочения показателей деятельности вузов на основе рейтинговых оценок. Так, например, в (Tarasenko, 2014) на примере образовательных систем обсуждаются трудности, возникающие в практике управления социальными системами на основе рейтингового оценивания состояний управляемых объектов. Рейтинг рассматривается как управленческая модель состояния управляемой системы. Обсуждаются возможности повышения качества управленческих решений за счёт усовершенствования рейтингового моделирования. В (Bodnaruk, 2018) проведено исследование содержательных особенностей, присущих рейтинговому процессу, и методов формирования рейтинга, позволяющих обеспечить эффективность процедур принятия решений.

Следует отметить, что результатами по квази-нейросетевому агрегированию показателей деятельности элементарных подсистем сложных систем, полученные в работах (Krasnov, 2013, Krasnov, A., Pivneva, S, 2021), являются, по существу, методы нелинейного рейтингового оценивания. Данное оценивание было практически использовано при построении информационной системы для мониторинга научной активности в инновационной структуре некоторых российских университетов, которая показала свою эффективность (Dorofeeva, 2016; Dorofeeva, 2019).

Поэтому в настоящей работе мы подробно приводим метод квази-нейросетевого формирования численных значений метаданных многочисленных показателей научных и инновационных данных. Это необходимо для построения систем оперативно-тактического управления научно-инновационной деятельностью университета.

Разрабатываемые нами методы дополняют методологию АНР, так как заимствуют такие подходы, как: парные отношения объектов; усеченное нормальное распределение; описание нечетких данных. При этом парные отношения объектов в виде приоритетов доминирования представлены в виде парных взаимодействий по аналогии с построением потенциалов взаимодействий объектов сплошных сред в физике. В то же время мы стараемся использовать как можно более простой и понятный механизм агрегирования данных, обеспечивающий системный синергизм (Handbook, 2008).

1 Модель квази-нейросетевого агрегирования данных

В данной модели предполагается, что всем N сбалансированным показателям S_1, S_2, \dots, S_N , относящимся к данным о научно-исследовательской и инновационной деятельности (НИИД) университета, присваивают конкретные значения, выраженные в числовых шкалах: число (публикаций, мероприятий и т.п.), баллы, проценты, денежные единицы и прочее. Для каждого показателя обычно задают верхние $S_1^{**}, S_2^{**}, \dots, S_N^{**}$ и нижние $S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*$ критериальные значения ($S_n^{**} = \max\{S_n\}, S_n^* = \min\{S_n\}, \forall n \in \overline{1, N}$).

Разобьём (декомпозируем) все показатели на группы или элементарные агрегаты (A, B, C, \dots) данных по признакам семантической (смысловой) однородности, функциональности и целевого назначения. Для каждого элементарного агрегата сформируем вектора (приведены вектора трех агрегатов):

$$(1) \mathbf{S}_A^T = (S_{A_1}, S_{A_2}, \dots, S_{A_K}); \mathbf{S}_B^T = (S_{B_1}, S_{B_2}, \dots, S_{B_P}); \mathbf{S}_C^T = (S_{C_1}, S_{C_2}, \dots, S_{C_Q}),$$

компоненты которых соответствуют функционально однородным группам показателей научно-инновационной деятельности вуза ($K + P + Q = N$).

Дискретную динамическую модель наблюдения состояния НИИД университета или его подразделения представим в виде:

$$(2) \mathbf{F}(t) = \mathbf{S}_m(t) + \mathbf{H}(t), \quad m = 1, 2, \dots, M,$$

где t – дискретное время; $\mathbf{S}_m(t)$ – вектор планового состояния для m -го направления НИИД; $\mathbf{H}(t)$ – вектор помех, определяемых нормальными усеченными распределениями.

В соответствии с (2) считается, что состояние НИИД университета, непосредственно относящееся к m -у направлению и измеренное в виде вектора \mathbf{F} или совокупности соответствующих ему показателей

F_1, F_2, \dots, F_N , близко к их запланированным критериальным значениям, определяемым вектором S_m , искаженным помехой H .

Оперативно-тактическое управление НИИД должно строиться на основе принципа автоматического регулирования совокупности показателей F_1, F_2, \dots, F_N , так, чтобы минимизировать влияние помехи H и поддерживать вектор F как можно ближе к выбранному вектору S_m ($m = 1, 2, \dots, M$) критериальных показателей.

В реальных условиях деятельности университета интенсивности помех из рассмотренной выше модели наблюдений (2) неизвестны. Например, монография принята к печати, но еще не вышла. Или, деньги должны были прийти на счет университета, но задержались. В этих условиях будем считать, что все компоненты H вектора H помехи из (2) независимы и распределены по нормальному симметрично-усеченному закону для любого m -го ($m = 1, 2, \dots, M$) направления НИИД:

$$(3) p_m(H_n) \cong \frac{1}{h_{mn}} \exp\left[-\frac{(F_n - \overline{S_{mn}})^2}{h_{mn}^2}\right], \forall n \in \overline{1, N},$$

дисперсии h_{mn}^2 которого в общем случае не известны.

Будем считать, что:

$$(4) h_{mn}^2 = 2\sigma_{mn}^2 \theta_m = \frac{2}{K-1} \sum_{k=1}^K (F_n^k - \overline{S_{mn}})^2 \theta_m, m = 1, 2, \dots, M,$$

а каждый n -ый показатель S_{mn} m -го направления НИИД имеет эмпирическую дисперсию σ_{mn}^2 с точностью до неизвестного параметра θ_m . При этом в каждом m -ом состоянии вектор F из (2) полностью определяется функцией правдоподобия:

$$(5) p_m(F | \theta_m) \cong \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S_{mn}})^2}{\theta_m^2 \sigma_{mn}^2}\right] \times \prod_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{\theta_m \sigma_{mn}}}, m = 1, 2, \dots, M.$$

Оценки θ_m^* параметров θ_m найдем, максимизируя функции правдоподобия $p_m(F | \theta_m)$. Тогда, исходя из условий $\partial p_m(F | \theta_m) / \partial \theta_m = 0$ (Малиновский, 2002), получим:

$$(6) \theta_m^{*2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S_{mn}})^2}{\sigma_{mn}^2}, m = 1, 2, \dots, M.$$

Тогда решение об отнесении вектора наблюдения F к какому-либо из направлений или классам (“ j ” или “ k ”), описываемых соответствующими функциями правдоподобий $p_j(F | \theta_j)$ и $p_k(F | \theta_k)$, примем на основании попарного сравнения отношений Λ_{kj} максимальных правдоподобий с отношением априорных вероятностей P_j и P_k гипотез “ j ” и “ k ” (Малиновский, 2002):

$$(7) \Lambda_{kj} = \frac{p_k(F | \theta_k^*)}{p_j(F | \theta_j^*)} = \left(\frac{\theta_j^{*2}}{\theta_k^{*2}}\right)^{\frac{N}{2}} = \left(\frac{\sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S_{jn}})^2}{\sigma_{jn}^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S_{kn}})^2}{\sigma_{kn}^2}}\right)^{\frac{N}{2}} > \frac{P_j}{P_k}.$$

По условию (7) состояние вектора F относят к классу, для которого Λ_{kj} принимает максимальное значение. Для распространенного случая одинаковых априорных вероятностей ($P_k = P_j$) вместо (7) справедливо эквивалентное, но более простое условие выбора гипотезы (k -ой или j -ой):

$$(8) \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S_{km}})^2}{\sigma_{km}^2}} > \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{Y_{jn}})^2}{\sigma_{jn}^2}}, k, j = 1, 2, \dots, M.$$

Исходя из (8), введем индикаторы:

$$(9) \langle I(\mathbf{F}, \overline{\mathbf{S}}_m) \rangle = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \frac{(F_n - \overline{S}_{mn})^2}{\sigma_{mn}^2}}, m = 1, 2, \dots, M,$$

определяющие нечеткие степени близости ($0 \leq I \leq 1$) вектора \mathbf{F} состояния НИИД критериальным областям, определяемым вектором $\overline{\mathbf{S}}_m$ и дисперсией σ_{mn}^2 из (5). Скобка $\langle I(\mathbf{F}, \overline{\mathbf{S}}_m) \rangle$ означает усреднение по всем $n \in \overline{1, N}$.

В дальнейшем в качестве «критериальных» векторов выберем $\overline{\mathbf{S}}_m = \mathbf{S}_m^{**} = (S_1^{**}, S_2^{**}, \dots, S_N^{**})^T$ и $\overline{\mathbf{S}}_m = \mathbf{S}_m^* = (S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*)^T$. При этом, обобщая (9), будем использовать индикаторы:

$$(10) \langle I^{**}(\mathbf{F}, \overline{\mathbf{S}}_m) \rangle = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \lambda_{mn} \frac{(F_n - S_{mn}^{**})^2}{\sigma_{mn}^2}}, \sum_{n=1}^N \lambda_{mn} = 1, m = 1, 2, \dots, M,$$

где λ_{mn} – значимости соответствующих показателей НИИД.

Воспользовавшись также идеей «минимизация расстояния до идеала эквивалентна максимальному увеличению расстояния до антиидеала» работы (Chiang, 2010), введем индикаторы:

$$(11) \langle I^*(\mathbf{F}, \overline{\mathbf{S}}_m) \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_{mn} \frac{(F_n - S_{mn}^*)^2}{\sigma_{mn}^2}}{1 + \sum_{n=1}^N \lambda_{mn} \frac{(F_n - S_{mn}^*)^2}{\sigma_{mn}^2}}, \sum_{n=1}^N \lambda_n = 1, m = 1, 2, \dots, M.$$

Индикаторы (10, 11) соответствуют нечетким мерам сходства (различия) вектора \mathbf{F} с соответствующими векторами \mathbf{S}_m^{**} (\mathbf{S}_m^*) и монотонно сасимптотически растут до 1 при приближении всех компонентов вектора показателей НИИД к верхним критериальным значениям или удалении от нижних критериальных значений для любого m -го режима функционирования. Последний случай характерен, когда повышение эффективности функционирования университета достигается за счет роста его показателей (энерговооруженности, капиталоемкости, числа публикаций, интеллекта, и т.п.).

Присвоим группе элементарных агрегатов $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \dots$ данных наряду с их групповыми индикаторами $\langle I_A \rangle, \langle I_B \rangle, \langle I_C \rangle, \dots$ весовые коэффициенты $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$, верифицирующие групповые значимости агрегатов для описания состояния НИИД. Совокупность индикаторов и коэффициентов значимости образуют численно описание метаданных первого уровня иерархии (см. Рис. 1).

На втором иерархическом уровне элементарные агрегаты $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{E}$ объединяют в агрегаты \mathbf{ABC} и \mathbf{DE} , и формируют метаданные второго иерархического уровня в виде индикаторов $\langle I_{ABC} \rangle$ и $\langle I_{DE} \rangle$, а также коэффициентов μ_{ABC} и μ_{DE} их значимости ($\mu_{ABC} + \mu_{DE} = 1$).

Агрегирование на последующих иерархических уровнях и формирование метаданных производится по аналогии с приведенной процедурой направленного графа Рис.1. При этом функционирование графа практически соответствует функционированию нейроподобной или квази-нейронной сети прямого распространения.

2 Практические результаты формирования численных значений метаданных многочисленных показателей научно-исследовательской и инновационной деятельности университета

Рассмотрим следующие практические результаты применения модели квази-нейросетевого агрегирования метаданных для различных уровней агрегирования с учетом взаимодействий агрегатов (Рис. 1).

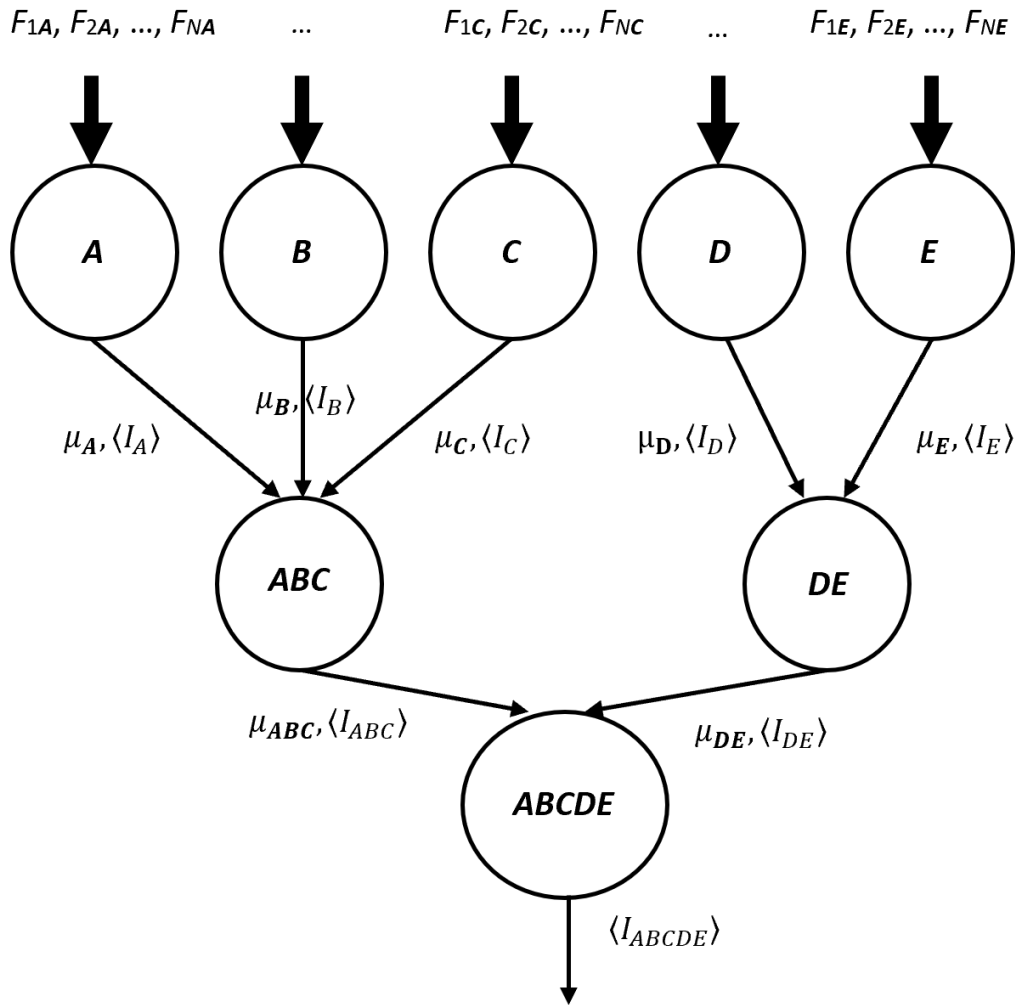


Рис. 1 Граф первого, второго и третьего иерархических уровней квази-нейросетевого параметрического агрегирования.

Предположим, что объединяют два элементарных агрегата **A** и **B**. В отсутствии их взаимодействия обычно используют известный средневзвешенный результат:

$$(12) \quad \langle I_{AB} \rangle = \mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle.$$

Учет взаимодействия этих элементарных агрегатов выразим, как (Krasnov, 2013):

$$(13) \quad \langle I_{AB} \rangle = \frac{\mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle - \varepsilon_{AB} \mu_A \mu_B \langle I_A \rangle \langle I_B \rangle}{\mu_A + \mu_B - \varepsilon_{AB} \mu_A \mu_B}, \quad \varepsilon_{AB} = \begin{cases} 1, & \text{for interaction aggregates;} \\ 0, & \text{for otherwies.} \end{cases}$$

$$\mu_{AB} = \mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B, \quad \mu_A + \mu_B + \mu_C = 1.$$

Предположим, что к парному агрегату **AB**с метаданными, описываемыми кортежем $\langle \mu_{AB}, I_{AB} \rangle$, добавляют элементарный агрегат **C** с метаданными $\langle \mu_C, I_C \rangle$. Тогда,

учитывая взаимодействия для тройного агрегата **ABC** на основании (13) рекурсивно получим:

$$(14) \quad \langle I_{ABC} \rangle = \frac{\mu_{AB} \langle I_{AB} \rangle + \mu_C \langle I_C \rangle - \mu_{AB} \mu_C \langle I_{AB} \rangle \langle I_C \rangle}{\mu_{AB} + \mu_C - \mu_{AB} \mu_C} =$$

$$\frac{\mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle + \mu_C \langle I_C \rangle - \mu_A \mu_B \langle I_A \rangle \langle I_B \rangle - \mu_A \mu_C \langle I_A \rangle \langle I_C \rangle - \mu_B \mu_C \langle I_B \rangle \langle I_C \rangle}{1 - \mu_A \mu_B - \mu_A \mu_C - \mu_B \mu_C + \mu_A \mu_B \mu_C} +$$

$$\frac{\mu_A \mu_B \mu_C \langle I_A \rangle \langle I_B \rangle \langle I_C \rangle}{1 - \mu_A \mu_B - \mu_A \mu_C - \mu_B \mu_C + \mu_A \mu_B \mu_C}.$$

Первое слагаемое в (14) соответствует парным взаимодействиям элементарных агрегатов, а последнее слагаемое – их тройным взаимодействиям. Полученная рекурсивная модель зависимости потенциала взаимодействия трех агрегатов через их парное взаимодействие аналогична взаимодействию молекул в физике сплошных сред. Ниже приведен пример более простой зависимости.

Рассмотрим синергетический эффект ΔI_{AB} от взаимодействия элементарных агрегатов:

$$(15) \quad \Delta I_{AB} = \frac{\mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle - \mu_A \mu_B \langle I_A \rangle \langle I_B \rangle}{\mu_A + \mu_B - \mu_A \mu_B} - \frac{\mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle}{\mu_A + \mu_B} = \frac{\mu_A \mu_B}{\mu_A + \mu_B} (\mu_A \langle I_A \rangle + \mu_B \langle I_B \rangle - \langle I_A \rangle \langle I_B \rangle).$$

Так, максимальный синергетический эффект $\Delta I_{AB} = 0.14$ достигается при $\mu_A = \mu_B = 0.5$ и $I_A = I_B = 0.5$.

В общем случае в рассмотренном на Рис. 1 графе возможны и обратные связи. Так, на Рис. 2 приведены графы элементарной и парной подсистем с обратными связями.

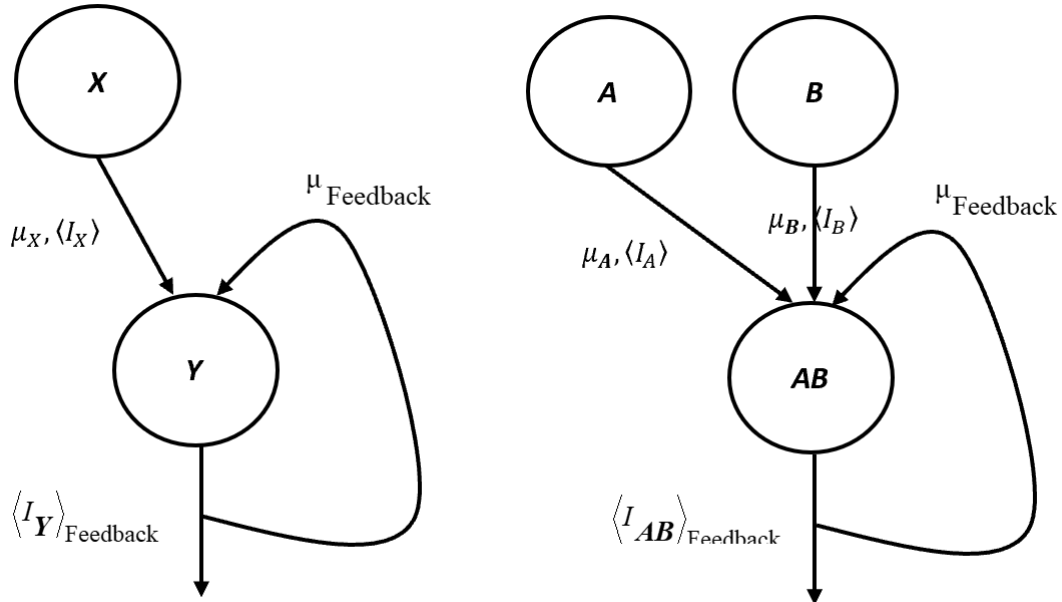


Рис. 2. Графы элементарной и парной подсистем с обратными связями
В соответствии с (12) выходы I_Y подсистем связаны с их входами I_X уравнениями:

$$(16) \quad \langle I_Y \rangle_{\text{Feedback}} = \frac{\langle I_X \rangle}{1 - \mu_{\text{Feedback}} (1 - \mu_{\text{Feedback}} \langle I_X \rangle)},$$

$$\langle I_{AB} \rangle_{\text{Feedback}} = \frac{\langle I_{AB} \rangle}{1 - \mu_{\text{Feedback}} (1 - \mu_{\text{Feedback}} \langle I_{AB} \rangle)}.$$

Из (16) следует, что обратная связь увеличивает синергизм подсистем. Так, на Рис. 3 приведен пример отклика $\langle I_Y \rangle_{\text{Feedback}}$ элементарной подсистемы на входное воздействие $\langle I_X \rangle$ при разных коэффициентах μ_{Feedback} обратной связи.

На Рис. 4 дана поверхность синергетического эффекта $\Delta I_{AB} = I_{AB}(I_A, I_B | \mu_{\text{Feedback}}) - I_{AB}(I_A, I_B | \mu_{\text{Feedback}} = 0)$ для случая, когда $\mu_A = \mu_B = \mu_{\text{Feedback}} = 0.5$.

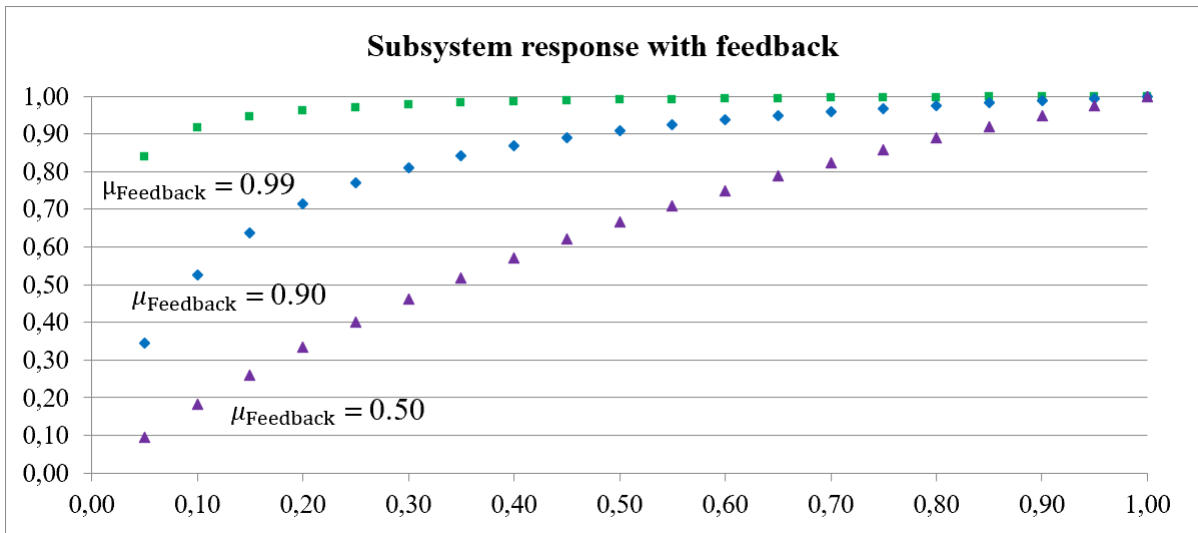


Рис. 3. Отклик $\langle I_Y \rangle_{\text{Feedback}}$ элементарной подсистемы на входное воздействие для различных коэффициентов μ_{Feedback} обратной связи.

Парциальный индикатор (потенциал) I или нечеткое описание метаданных, связанных с количественным нормированным значением x любого единичного показателя F научно-исследовательской или инновационной деятельности сотрудника факультета, оценим в соответствии с (11), например, как:

$$(17) \quad I^* = \hat{x} / (1 + \hat{x}).$$

Так, для числа публикаций $x = F^2$ ($F = 1, 2, \dots, N$); для денежных средств $x = (F^2 / F_{\text{plan}}^2)$. При увеличении x потенциал I растет и асимптотически стремится к 1.

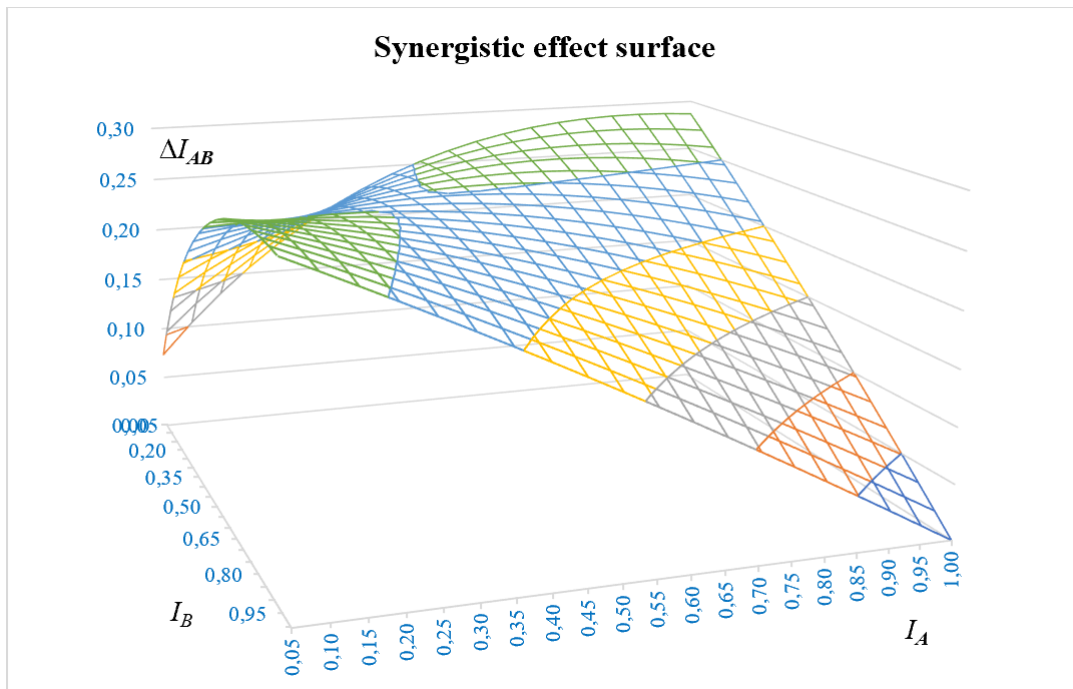


Рис. 4. Поверхность синергетического эффекта для парной агрегированной подсистемы с обратной связью.

Оценим потенциал подразделения (кафедра/факультет) университета, как среднее значение потенциалов I_k^* всех K сотрудников подразделения $\langle I^* \rangle = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k^* = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k / (1 + x_k)$.

Так, например, если на кафедре $K = 10$ сотрудников и 4 из них имеют $F = 3$ коллективных статей, то потенциал каждого сотрудника по данному показателю будет иметь значение $I_k^* = 3^2 / (1 + 3^2) =$

0.9. Если оставшиеся 6 сотрудников не имеют статей, то потенциал кафедры по данному показателю будет иметь значение $\langle I^* \rangle = (4 * 0.9)/10 = 0.36$.

Будем производить агрегирование потенциалов различных направлений НИИД университета с учетом значимости μ_m каждого m -го направления. Тогда возможно применить модель (10), используя в качестве аргументов парциальные потенциалы $\langle I_m \rangle$:

$$(18) \langle I^* \rangle_{\Sigma} = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \mu_n (\langle I^* \rangle_n - 1)^2}, \quad \sum_{n=1}^N \mu_n = 1, \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

Эффект взаимодействия парциальных потенциалов $\langle I^* \rangle_m$ неявно представлен в модели (18) в силу ее сильной нелинейности.

Интересно сравнить результаты агрегирования на основе моделей (12), (13) и (18). Для этого в Таблице 1 приведены значения $\langle I \rangle_{Sc}$ и $\langle I \rangle_{In}$ потенциалов результативности научной и инновационной деятельности 12-и факультетов одного из российских университетов при одинаковых значимостях этих деятельностей, т.е. $\mu_{Sc} = \mu_{In} = 0.5$. Обобщенная результативность НИИД определяется агрегированными потенциалами $\langle I \rangle_{\Sigma(12)}, \langle I \rangle_{\Sigma(13)}, \langle I \rangle_{\Sigma(18)}$ соответственно. Как следует из (12), потенциал $\langle I \rangle_{\Sigma(12)}$ не учитывает взаимодействия ($\varepsilon = 0$). В смежных колонках представлены рейтинги R факультетов.

Таблица 1

Результаты НИИД								
	$\langle I \rangle_{Sc}$	$\langle I \rangle_{In}$	$\langle I \rangle_{\Sigma(12)}$	$R_{(12)}$	$\langle I \rangle_{\Sigma(13)}$	$R_{(13)}$	$\langle I \rangle_{\Sigma(18)}$	$R_{(198)}$
μ	0.5	0.5						
	1	2	3	4	5	6	9	10
1	0,58	0,98	0,780	3	0,851	2	0,919	2
2	0,95	0,97	0,960	1	0,973	1	0,998	1
3	0,85	0,54	0,695	5	0,774	5	0,895	5
4	0,76	0,02	0,390	9	0,515	9	0,663	9
5	0,77	0,49	0,630	6	0,714	6	0,865	6
6	0,38	0,81	0,595	8	0,691	8	0,826	8
7	0,68	0,90	0,790	2	0,849	3	0,947	3
8	0,83	0,38	0,605	7	0,702	7	0,829	7
9	0,63	0,15	0,390	9	0,489	10	0,699	10
10	0,32	0,10	0,210	12	0,269	12	0,611	12
11	0,48	0,16	0,320	11	0,401	11	0,672	11
12	0,72	0,84	0,780	3	0,838	4	0,951	4

Из таблицы видно, что в линейной модели агрегированные потенциалы, не учитывающие взаимодействие, не позволяет различать состояния факультетов (колонка 4, строки 1, 2 и 4, 9). В то же время модели (1) и (18) дают одинаковые результаты (колонки 6 и 10).

На Рис. 5 приведено 2D представление метаданных НИИД факультетов университет, наглядно отражающих его состояние.

Все приведенные выше модели, учитывающие взаимодействие, позволяют предпринять управленческие решения, например, по организации помощи тем подразделениям университета, которые имеют достаточно высокие научные потенциалы, но пока еще не достигли успехов в инновационной деятельности.

Заключение

Полученные в работе результаты и их апробация в ряде российских университетах позволяет рассматривать иерархическое квази-нейросетевое агрегирование данных, как достаточно эффективный инструмент для построения системы управления научно-инновационной деятельностью университета на основе мониторинга его многочисленных показателей. В работе не рассматривались эти конкретные показатели, однако уже из обзора, приведенного в первой части работы, видно, что их выбор играет важную роль. Тем не менее, при правильном выборе таких показателей не менее важно уметь

воспользоваться их значениями. Предложенный в работе метод как раз и позволяет опираться на значения совокупности показателей, увязанных иерархией отношений их метаописаний, которая строится по восходящему принципу – отношения метаданных верхнего уровня строятся с учетом взаимодействий метаданных нижних уровней. Это позволяет реализовать системный подход в оценивании состояний научно-инновационной деятельности университета, так как именно при системном подходе свойство системы не объясняется суммой свойств составляющих ее частей.

Литература

1. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1997. – 256с.
2. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Соловьев М.М. Моделирование развития крупномасштабных систем. – М.: Экономика. 1983. – С.35-38.
3. Jackson J.K. Medical data management // Archives of Computer Science. Vol. 28. 1992, № 5. – P.123-134.
4. Pinheiro, R. and Young, M. (2017), "The University as an Adaptive Resilient Organization: A Complex Systems Perspective" // Theory and Method in Higher Education Research. Vol. 3. Emerald Publishing Limited, P. 119-136. <https://doi.org/10.1108/S2056-375220170000003007>
5. Saaty T. L. (2008), Decision making with the Analytic Hierarchy Process // International Journal of Services Sciences 1 (1). P. 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
6. Karathanos Demetrius, Karathanos Patricia (2005) Applying the Balanced Scorecard to Education // Journal of Education for Business, 80:4. P. 222-230. <https://doi.org/10.3200/JOEB.80.4.222-230>
7. Gonzalez Rafael C., Woods Richard V. Digital image processing (Third Edition), Inc, Prentice Hall, 2016. – 980 p. URL: <https://www.biblio.com/book/digital-image-processing-third-edition-rafael/d/911894851>
8. Павловский, Ю. (1984). Теория факторизации и декомпозиции управляемых динамических систем и ее приложения. Известия АН СССР. Техническая кибернетика. № 2. С. 45-47.
9. Pavlovskij, YU. (1984). Teoriya faktorizacii i dekompozicii upravlyаемых динамических систем i ee prilozheniya. Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskayakiybernetika. № 2. С. 45-47. (In Russia)
10. Цурков, В.И. (1988). Динамические задачи большой размерности. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 288 с. — (Теория и методы системного анализа). ISBN 5-02-013898- URL: https://www.studmed.ru/curkov-vi-dinamicheskie-zadachi-bolshoy-razmernosti_34a0a56defa.html
11. Curkov, V.I. (1988). Dinamicheskie zadachi bol'shoj razmernosti. – М.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. – 288 s. — (Teoriya i metodysistemnogoanaliza). ISBN 5-02-013898 (In Russia) URL: https://www.studmed.ru/curkov-vi-dinamicheskie-zadachi-bolshoy-razmernosti_34a0a56defa.html
12. Saaty T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process // Management Science. 1986. Vol. 32. Issue 7. P. 841-855. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.32.7.841>
13. Краснов А., etal (2013). Агрегированное параметрическое описание состояний сложных систем на разных уровнях иерархии. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии (I2T)» (Прага, 22-26 апреля, 2013). Том 2 «Инновационные информационные технологии в науке». – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ. – 596 с. (С. 278-285). URL: <http://optic.cs.nstu.ru/files/Article/Rab/I2T%202013.pdf>
14. Krasnov A., et al (2013). Agregirovannoe parametricheskoe opisaniye sostoyaniy slozhnyh system na raznyh urovnyahierarhii. borniktrudov II Mezhdunarodnojnauchno-prakticheskoykonferencii «Innovacionnyeyinformacionnyetekhnologii (I2T)» (Praga, 22-26 aprelya, 2013). Tom 2 «Innovacionnyeyinformacionnyetekhnologii v nauke». – М.: MIEM NIU VSHE. – 596 s. (С. 278-285). (In Russia) URL: <http://optic.cs.nstu.ru/files/Article/Rab/I2T%202013.pdf>
15. Šerifi I Veis, Dašii Predrag, Jeþmenica I Ratomir, Labovii Dragana. Functional and Information Modeling of Production Using IDEF Methods // Strojniškovestnik - Journal of Mechanical Engineering 55 (2009) 2, P. 131-140. UDC 658.511 Special issue. URL: https://www.svjme.eu/?ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs3/1563/submission/1563-1-1898-1-2-20171103.pdf&id=4931
16. Берж К. Теория графов и ее приложения / Пер. с франц. под ред. И. А. Вайнштейна. – М.: ИЛ, 1962. – 319 с.
17. Berzh K. Teoriyagrafov i ee prilozheniya / Per. s franc. pod red. I. A. Vajnshtejna. – М.: IL, 1962. – 319 s. (In Russia)
18. Брук Б. Н., Бурков В. Н. Методы экспертных оценок в задачах упорядочения объектов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1972 – №3. – С. 3–11.

19. *Bruk B. N., Burkov V. N.* Metodyek spertnyhocenok v zadachahuporyadocheniyaob"ektov // Izv. AN SSSR. Tekhnicheskayakibernetika. – 1972 – №3. – S. 3–11. (In Russia)
20. *Saaty T. L.* An eigenvalue allocation model for prioritization and planning Energy Management and Policy Center. – University of Pennsylvania, 1972.
21. *Zahedi F.* The Analytic Hierarchy Process – a survey of the method and its applications//Interfaces. – 1986, Vol. 16, №4. – P. 96–108.
22. *Xu Shubo.* References on the analytic hierarchy process // Institute of Systems Engineering. – Tianjin: Tianjin university, 1986. - 15 p.
23. *Saaty T. L.* Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process // Management Science. 1986, July. – Vol. 32, №7. – P. 841-855.
24. *Saaty T. L., Vargas L. G.* Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process//Socio-Economic Planning sciences. – 1986. – Vol. 20, №6.
25. *Van Laathoven.* A fuzzy extension of Saaty's priority theory//Fuzzy Sets and Systems. 1983. – Vol. 11, №3. – P. 229–241.
26. *Buckley J. J.* Fuzzy hierarchycal analysis//Fuzzv Sets and Systems. – 1985. – Vol. 17, №3. – P. 233–247.
27. *Ishizaka A., Labib A.* (2009) Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations, OR Insight, 22(4): 201–220. doi:10.1057/ori.2009.10
28. *Saaty T. L.* (2015) On the Measurement of Intangibles. A Principal Eigenvector Approach to Relative Measurement Derived from Paired Comparisons, Cloud of Science, 2(1):5–39. [In Rus]
29. *Pinheiro, R. and Young, M.* (2017), "The University as an Adaptive Resilient Organization: A Complex Systems Perspective", Theory and Method in Higher Education Research (Theory and Method in Higher Education Research, Vol. 3), Emerald Publishing Limited, pp. 119-136. <https://doi.org/10.1108/S2056-375220170000003007>
30. *Dos Santos Paulo Henrique, Neves Sandra Miranda, Sant'Anna Daniele Ornaghi, Carlos Henrique de Oliveira, Henrique Duarte Carvalho.* The analytic hierarchy process supporting decision making for sustainable development: An overview of applications // Journal of Cleaner Production. Volume 212, 1 March 2019, Pages 119-138.
31. *Jayakumar Vijayarangam, Ajiteshpatnaik, Kannaiyan Shanmuganandam, C. Thiagarajan, S. Ranganathan.* Analytical hierarchical process framework for evaluation and selection of a university in abroad for higher education // International Journal of Pure and Applied Mathematics 116 (23). December 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/321492456_Analytical_hierarchical_process_framework_for_evaluation_and_selection_of_a_university_in_abroad_for_higher_education
32. *Konina O.V., Nanetadze E.D.* (2019) Managing a Modern University: The Role of Business Processes in the Structure of Establishments of Higher Professional Education. In: Popkova E., Ostrovskaya V. (eds) Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. ISC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 726. Springer, Cham
33. *Palomares-Montero, D. and Garcia-Aracil, Adela.* (2011) What are the key indicators for evaluating the activities of universities? // Research Evaluation, Volume 20, Issue 5, December 2011, Pages 353–363, <https://doi.org/10.3152/095820211X13176484436096>
34. *Ferretti Federico, PereiraÂngela Guimarães, VértesyDániel, Hardeman Sjoerd.* Research excellence indicators: time to reimagine the ‘making of’? // Science and Public Policy, Volume 45, Issue 5, October 2018, Pages 731–741, <https://doi.org/10.1093/scipol/scy007>
35. *Kühne Conny, BöhmKlemens.* Assessing the suitability of an honest rating mechanism for the collaborative creation of structured knowledge // World Wide Web (2014) 17. P. 85–104. DOI 10.1007/s11280-012-0193-1
36. Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and user guide. ISBN 978-92-64-04345-9 // OECD 2008. – 160 p. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/707781468263936449/pdf/wps4114.pdf>
37. *Hoornweg Daniel, NuñezFernanda Ruiz, FreireMila, PalugyaiNatalie, VillavecesMaria,* Herrera Eduardo Wills. City Indicators: Now to Nanjing // World Bank Policy Research Working Paper 4114, January 2007 (Third World Urban Forum, Vancouver, June 22, 2006). – 71 p. URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/707781468263936449/pdf/wps4114.pdf>
38. *Qiu Chenxi, SquicciariniAnna, RajtmajerSarah.* Rating. Mechanisms for Sustainability of Crowdsourcing Platforms // CIKM '19 Proceedings of the 28th ACM International Conference on

- Information and Knowledge Management. Beijing, China — November 03 - 07, 2019. Pages 2003-2012. doi>10.1145/3357384.3357933
39. *Foster, Joshua*. On the Relative Efficiency of Crowdsourced Rating Mechanisms: Experimental Evidence (September 28, 2019). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3472119> URL: [file:///C:/Users/USER/Downloads/SSRN-id3472119%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USER/Downloads/SSRN-id3472119%20(1).pdf)
 40. "QS World University Rankings 2020". Top Universities. 2019-06-05. Retrieved 2019-07-12. URL: <https://www.topuniversities.com/university-rankings/world-university-rankings/2020>
 41. *Тарасенко Ф.П.* О роли рейтингов в управлении системой образования // Проблемы управления в социальных системах. 2014. Том 7. Вып. 11. С. 144-155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-rol-i-reytingov-v-upravlenii-sistemoy-obrazovaniya>
 42. *Tarassenko F.P.* O rolirejtingov v upravleniisistemjobrazovaniya // Problemy upravleniya v social'nyhsistemah. 2014. Tom 7. Vyp. 11. S. 144-155. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-rol-i-reytingov-v-upravlenii-sistemoy-obrazovaniya>
 43. *Bodnaruk I. L., Shlapak L. S.* Peculiarities of the stages of rating assessment formation in rating management system // ISSN 2071-2227, Naukovyi Visnyk NHU, 2018, № 2. P. 136-141. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/22
 44. *Dorofeeva V.I., Motin A.G., Nikol'skii, Fedyaev Yu.S.* On the development of the scientific work monitoring system at higher educational institutions // Scientific and technical information processing, 2016, Vol. 43, No. 3. – P. 166–173. URL: <https://www.springerprofessional.de/en/on-the-development-of-the-scientific-work-monitoring-system-at-h/15617878>
 45. *Dorofeeva V.I., Nikol'skii D.N., Fedyaev Y.S.* The Information System for Monitoring Research Activities in the Innovative Structure of a Univerity // Scientific and Technical Information Processing. Vol. 46. Issue 1. 2019. P. 28-33. doi>10.3103/S0147688219010064
 46. *Малиновский Л.Г.* Анализ статистических связей: Модельно-конструктивный подход. – М.: Наука, 2002. – 688 с. [InRus] URL: http://www.alib.ru/5_malinovskiy_1_g_analiz_statisticheskikh_svyazey_modelno_konstruktivnyy_podhod_w1t63804e42c1b93f2c895e8f3234ae466f35c.html
 47. *Malinovskij L.G.* Analizstatisticheskikhsvyazej: Model'no-konstruktivnyjpodhod. – М.: Nauka, 2002. – 688 с. [In Rus] http://www.alib.ru/5_malinovskiy_1_g_analiz_statisticheskikh_svyazey_modelno_konstruktivnyy_podhod_w1t63804e42c1b93f2c895e8f3234ae466f35c.html
 48. *Chiang Kao*. Weight determination for consistently ranking alternatives in multiple criteria decision analysis // Applied Mathematical Modelling. Volume 34, Issue 7, July 2010. P. 1779-1787. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.022>
 49. *Krasnov, A., Pivneva, S.* Hierarchical quasi-neural network data aggregation to build a university research and innovation management system (2021) Advances in Intelligent Systems and Computing, 1259 AISC, pp. 12-25. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-850900971130&doi=10.1007%2f978-3-030-57453-6_2&partnerID=40&md5=ea842c191e45bbfa7bcad7c532ab5971 DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_2