



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 34 за 2022 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Ю.Г. Рыков

О моделировании развития
региона в условиях высокой
неопределенности и
недостатка данных

Статья доступна по лицензии
Creative Commons Attribution 4.0 International



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Рыков Ю.Г. О моделировании развития региона в условиях высокой неопределенности и недостатка данных // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 34. 16 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2022-34>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-34>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Ю.Г. РЫКОВ

**О моделировании развития региона
в условиях высокой неопределенности
и недостатка данных**

Москва — 2022

Рыков Ю.Г.

О моделировании развития региона в условиях высокой неопределенности и недостатка данных

Препринт представляет собой пример практической реализации модифицированной методологии моделирования при помощи нечетких когнитивных карт, которая была представлена автором ранее в издании «Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша». Описан вариант модели развития региона РФ в условиях высокой неопределенности внешней среды и при недостатке исходных данных. Такая ситуация характерна, например, для моментов возникновения эпидемий или конфликтного противостояния.

Ключевые слова: сложная система, когнитивное моделирование, взвешенный оргграф, вирусная эпидемия, развитие региона, влияние факторов

Yuri Germanovich Rykov

On modeling the development of the region in conditions of high uncertainty and lack of data

The preprint is an example of the practical implementation of a modified modeling methodology using fuzzy cognitive maps, which was presented by the author earlier in the publication in "M.V. Keldysh IPM Preprints". A variant of the model of the development of the RF region in conditions of high uncertainty of the external environment and with a lack of initial data is described. This situation is typical, for example, for the moments of the outbreak of epidemics or conflict confrontation.

Key words: complex system, cognitive simulation, weighted digraph, viral epidemic, the development of the region, the influence of factors

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNPq (Бразилия), Фонда содействия инновациям (Россия), DBT, DST (Индия), MOST, NSFC (Китай), SAMRC (ЮАР) в рамках научного проекта № 20-51-80002.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. О регрессии и эконометрике | 4 |
| 2. Краткое описание математической структуры используемой версии когнитивных карт | 8 |
| 3. Построение и исследование модели развития Калининградской области ... | 11 |
| 4. Заключение | 15 |

Введение

Устойчивость регионального развития лежит в основе процветания экономики любого государства. Это положение хорошо известно и не требует особого обсуждения. Однако к настоящему времени в мире, по мнению автора, сложились особые условия, которые ставят новые важные акценты на проблемы, связанные с эволюцией подсистем, в частности, на развитие регионов. Сейчас человечество имеет дело со сложными системами практически во всех областях деятельности. То есть с сущностями, состоящими из огромного числа элементов, характеризующимися связями друг с другом. Можно предположить, что к началу текущего века возникла иллюзия, что государства на нашей планете естественным образом двигаются к некоторой достаточно упорядоченной системе, которая позволит человечеству скоординировано двигаться в сторону всеобщего процветания. Это положение служило основой идеологии глобализма. С другой стороны, возникновение достаточно агрессивной экологической озабоченности, так называемой «зеленой повестки», и мировой экономической кризис 2008 года показали, что в этой концепции не все гладко. Однако, с нашей точки зрения, идеология глобализма потерпела полный крах в 2020 году с возникновением явления под названием «коронавирусная пандемия» и последовавшим за нею курсом на торможение мировой экономики, см., например, обзор [1]. Последовавшие за этим снижение уровня жизни, хотя предполагавшееся как временное, а затем и рост геополитической напряженности, приведший в 2022 году к необходимости резкого переформатирования экономических связей, создали перспективу уже мировой экономической рецессии и стабильного тренда на снижение уровня жизни для подавляющего большинства населения нашей планеты. Глобальный мир теперь распадается и подвергается процессу «регионизации».

С точки зрения автора, глубинной причиной данной тенденции, если оставить в стороне эмоциональные и политизированные оценки, является тот факт, что человеческая деятельность сильно усложнилась, то есть практически вся деятельность человека стала проходить в рамках сложных систем, как было сказано выше, причем независимо от уровня интеграции: планета, государство, регион, район и т.д. Прежняя мировая экономическая система (с этой точки зрения различия между различными –измами несущественны) фактически предполагала наличие разделения людей на «бенефициаров» и «прочих». Негласно предполагалось, что вторая категория людей будет жить в странах-колониях, которые будут эксплуатировать страны проживания людей первой категории. Данная система стремится к относительно простой структуре управляющий-управляемый в масштабах всего мира с превалированием внушения и обмана разного рода и, по-видимому, представляет собой тупик. В настоящее время эта тенденция проявлена очень четко, именно поэтому здесь мы на этом останавливаемся и в то же время не цитируем огромное количество работ, которые в той или иной форме на разных этапах исторического пути

исследовали процесс мирового развития с указанной точки зрения, т.к. это увело бы далеко в сторону от основной цели препринта.

Таким образом, мир качественно усложнился на всех своих срезах, и для его осмысления необходима методология, которая будет отличаться от прежних подходов тем, что будет иметь дело со значительно большим количеством разнородных факторов, подлежащих учету. В данной публикации вопрос моделирования развития региона рассматривается именно с этой точки зрения. В качестве примера взята Калининградская область. Вследствие сугубо предварительного характера работы и высказывания достаточно спорных, особенно с точки зрения экономистов, утверждений, ссылки на литературу определяются лишь целями иллюстрации основных положений данного препринта и никак не отражают имеющегося многообразия публикаций в отношении экономического моделирования, в том числе и на региональном уровне.

Препринт организован следующим образом. В разделе 1 приведены соображения о недостаточности обычного экономического анализа для описания сложных экономических систем. Раздел 2 посвящен краткому изложению структурного подхода, и, наконец, в разделе 3 продемонстрировано применение этого подхода на примере расстановки приоритетов развития Калининградской области. При этом использовались только общедоступные данные. В Заключении кратко сформулированы выводы из проделанного исследования.

Заканчивая вводный раздел, автор выражает благодарность О.И. Дранко, В.И. Балуте и В.А. Судакову за стимулирующие дискуссии и обсуждение результатов.

1. О регрессии и эконометрике

Как показывает опыт, экономические реалии при развитых рыночных отношениях имеют дело преимущественно со случайными величинами. И смысл понятия регрессионной зависимости состоит в том, что ищется зависимость двух (при простой регрессии) случайных величин. А именно, пусть имеется выборка из совместного распределения пары случайных величин (ξ, η) , тогда под «регрессией» $r(x)$ понимается условное математическое ожидание

$$r(x) = E(\eta | \xi = x). \quad (1)$$

Исторически смысл термина «регрессия» состоял в том, что при наблюдении за определенными физическими характеристиками людей, относящихся к разным поколениям, у потомков была выявлена тенденция «возвращения» к средним значениям, даже если родители имели заметно отклоняющиеся от среднего значения характеристики. То есть имел место регресс (regression). В дальнейшем это стало общим названием для выражения зависимостей,

основанных на статистических закономерностях, хотя, с точки зрения смысла слов, данный термин, скорее всего, является неудачным.

В дальнейшем мы сосредоточимся на случае линейных зависимостей, т.к. препринт в основном имеет методологический характер, а появление нелинейностей, как правило, влечет за собой необходимость значительных технических усилий. В экономике в этом случае связь величин выражается анзатцем

$$Y = a + bX + \varepsilon, \quad (2)$$

где X является независимой переменной, ε – как правило, нормально распределенная случайная величина и, соответственно Y – тоже случайная величина, a и b – неизвестные коэффициенты, для которых надо сделать оценки по наблюдениям $(X_i, Y_i), i = 1, \dots, n$. Также на основе теории вероятностей можно оценить статистическую значимость полученной регрессии. Формула (2) выражает числовую связь двух факторов X и Y , которая может и не иметь причинно-следственного характера. Данный подход обобщается на случай, когда независимых факторов много, при этом можно выявить статистическую значимость каждого независимого фактора в регрессии типа (2).

В чистом виде соотношения типа (2) могут отражать достаточно медленно меняющуюся, устойчивую реальность. Если наблюдается заметная динамика, то можно прийти к обобщениям, рассматривая X и Y как случайные процессы, но здесь важными препятствиями оказываются именно нестационарность процессов и высокая волатильность. Для учета этого разработаны специальные методы, например, рассмотрение разностей ряда данных или метод коинтеграции (т.е. поиск стационарной комбинации между нестационарными переменными). В любом случае формулы типа (1) или (2) описывают «влияние» некоторого набора факторов (X^1, X^2, \dots, X^k) на другой фактор Y . В данном случае влияние будет характеризоваться коэффициентом b , своим для каждого из факторов $X^j, j = 1, \dots, k$.

Если соединить стрелками факторы X^j с фактором Y и приписать каждому ребру соответствующую величину b , то получится структура, аналогичная искусственному нейрону, но с тривиальной функцией активации. Тогда процесс построения регрессии можно интерпретировать как процесс обучения данного нейрона по специфическому алгоритму с использованием случайных величин. Можно обойтись и без случайности, обрабатывая данные, например, по методу наименьших квадратов, т.е. минимизируя функцию ошибки. То есть с концептуальной точки зрения достаточно рассматривать детерминированный случай, переход к операциям со случайными величинами не представляет существенных концептуальных затруднений. То есть основной момент, на который здесь обращается внимание, состоит в том, что регрессия может быть рассмотрена как процесс обучения простейшей нейросети, а получаемые в процессе обучения коэффициенты, связанные с ребрами

искусственного нейрона, могут быть рассмотрены как степени «влияния» факторов X^j на фактор Y .

Отметим, что широко распространенные балансовые макроэкономические модели, см., например, [2, 3], также, вообще говоря, можно интерпретировать подобным образом. А именно, путем последовательной агрегации выбранных показателей можно построить граф в виде дерева, в конечных вершинах которого находятся «балансовые» переменные: для выполнения балансовых соотношений они должны равняться нулю. Далее необходимо обучить модель достигать равенства нулю «балансовых» переменных и определять соответствующие значения факторов. Здесь ищутся значения факторов, а веса ребер считаются известными. Но можно рассматривать и задачи другого типа: при заданных значениях факторов определить веса ребер, то есть степени «влияния», чтобы выполнялись приближенные балансовые соотношения. В целом общий подход к такого рода моделированию с точки зрения консалтинга можно найти, например, в [4].

С другой стороны, популярность балансовых моделей связана, с нашей точки зрения, с проблемой данных в РФ. Если агрегированные в той или иной степени данные доступны в публичных источниках, то подробные данные по отдельным субъектам хозяйствования, по транспортировке, по перемещению населения и т.п., как правило, недоступны. Здесь интересен подход, связанный с анализом и прогнозированием финансовой отчетности предприятий [5, 6], для которого можно найти информацию, по крайней мере, для крупных экономических акторов. «Изюминкой» подхода является прогнозирование финансовой отчетности организаций с помощью специальной экспресс-модели. Утверждается, что из этой информации можно извлекать выводы, связанные с материальным процессом производства на конкретных предприятиях, и устанавливать причинно-следственные связи. Дело в том, что в традиционных макромоделях опираются на опубликованную официальную агрегированную отчетность и прогнозируют будущую официальную отчетность. При этом за кадром остаются конкретные реальные процессы, о которых можно только догадываться.

Мы совсем не затрагиваем обширную тему таких более сложных и детализированных моделей, как мультиагентные модели, модели общего равновесия (computable general equilibrium – CGE), выросшие из методологии межотраслевого баланса, модели динамического стохастического общего равновесия (dynamic stochastic general equilibrium – DSGE) и т.п. Подобные модели, с точки зрения автора, станут очень сложными при рассмотрении, например, сотен факторов, и их будет очень сложно калибровать, по крайней мере в условиях РФ, по причине отсутствия общедоступных и достаточно подробных данных.

В рамках настоящей публикации мы остановимся на моделях так называемых нечетких когнитивных карт, то есть на системе факторов, организованных в направленный граф, вершины и ребра которого снабжены

весами той или иной природы. Эта тематика очень широко представлена в мировой литературе, получить представление о ней можно, например, по «базовым» публикациям основателя данного направления Б. Коско [7–9]. Здесь мы будем использовать модификацию технологии когнитивных карт, которая проводит определенную параллель между когнитивными картами и нейросетями, см. [10, 11], где также представлен небольшой обзор текущих направлений развития технологий нечетких когнитивных карт. В рамках данного препринта можно сказать, что когнитивная карта представляет собой комбинацию искусственных нейронов, отражающую функционирование конкретной системы. Отметим, что интерпретация работ [10, 11], с одной стороны, предполагает возможность обучения (например, поиска весов ребер) когнитивной карты на наборе данных, что делает ее обобщением техники регрессий. Но, с другой стороны, позволяет определить и более простые характеристики, например, характеристику «влияния», которой в значительной степени и посвящен препринт, а также описать ее распространение по элементам системы в зависимости от структуры соответствующего графа.

С точки зрения автора, «простые» характеристики достаточно важны, и их стоит изучать в первую очередь, т.к. все современные реальные системы являются сложными. То есть они содержат сотни, если не тысячи, разнородных факторов и находятся в постоянно меняющемся окружении. Указанную нестабильность можно описать следующим образом. Пусть, например, на единице некоторого масштаба времени, например, месяца, происходит некий процесс, и его можно описать десятью факторами. Но в следующий месяц произойдет «слом тренда», как, например, описано в [3], при этом набор определяющих факторов может смениться. То есть для описания процесса на горизонте года понадобится уже больше сотни факторов. Именно вследствие такой «нестационарности» необходимо рассматривать сложные системы и решать для них скорее задачу целеполагания и достижения целей, а не собственно прогноза показателей. Кроме того, при включении в рассмотрение слабоформализуемых сущностей, например, фактора «политической воли», а такие сущности в последнее время стали играть все большую роль в противовес экономическим факторам, простые характеристики типа «влияния» могут быть приписаны таким факторам на основании выражений естественного языка (различные нечеткие интерпретации).

В последующих разделах будет построена простая модель развития Калининградской области на основе подхода нечетких когнитивных карт, которая будет иллюстрировать положения, высказанные выше. Именно Калининградская область взята для примера и вследствие того, что это анклав, для которого проще выделить внешние факторы и можно обойтись небольшим количеством внутренних факторов. Используемая технология подразумевает использование вычислительных средств, и на первом этапе используется относительно простое ПО, разработанное группой авторов [12] и достаточное для иллюстративных целей. Однако расчеты для большого количества

факторов в данной версии ПО занимают много времени, необходимы оптимизация и перенос на высокопроизводительные вычислительные средства. Поэтому в настоящем препринте использована система с относительно небольшим количеством факторов.

2. Краткое описание математической структуры используемой версии когнитивных карт

В настоящем препринте используется вариант когнитивных карт, подробно описанный в [10], [11] и [13]. Отметим, что еще одна версия близкого подхода появилась ранее в [14]. В данном пункте мы вкратце напомним соответствующие определения и конструкции. Приводимое ниже описание в целом соответствует широко представленному в литературе описанию строения когнитивных карт, особенно в нечетком варианте, но акцентирует внимание на вычислительных процедурах, которые можно связать с такой картой.

Пусть имеется некоторый набор элементов/факторов $A = \{A_j, j = 1, \dots, N\}$, которые каким-то образом взаимодействуют между собой и образуют некоторую систему. Тогда такую систему можно представить в виде ориентированного графа (A, E) с набором вершин $\{A_j\}$ и ребер, выражающих отношение зависимости. Как правило, ребра соответствуют подмножеству E множества упорядоченных пар вершин. Обозначим через $e_{ij} \equiv (A_i, A_j)$ элемент множества пар всех вершин из A ; $e_{ij} \in E$, если существует ребро, соединяющее A_i и A_j . Будем приписывать вершинам и ребрам некоторые характеристики A_i и a_{ij} соответственно, для целей данного препринта достаточно, чтобы эти характеристики были лишь числовыми. Обозначим через $V_{A_j} = \{i : e_{ij} \in E\}$. И каждой вершине графа поставим в соответствие функцию $A_j = \mathfrak{A}_j(\{A_k, a_{kj}\})$, $k \in V_{A_j}$. Функция \mathfrak{A}_j позволяет вычислить значение вершины A_j , если известны значения тех вершин, от которых A_j зависит, и значения входящих ребер. Введем дальнейшее упрощение и будем считать, что $a_{ij} \geq 0$ и $\sum_i a_{ij} = 1 \forall j$. Кроме того, предположим, что функции \mathfrak{A}_j являются линейными.

Итак, при сделанных выше предположениях связь между вершинами осуществляется на основе вычисления соответствующих линейных числовых функций $A_i = \mathfrak{A}_i(\{A_k, a_{ki}\})$, $k \in V_{A_i}$, $i = 1, \dots, N$.

На этой основе введем определения согласованности вершин A , представляющих собой совокупность элементов некоторой системы, и степени влияния вершин в системе. Пусть существуют такие $j = \omega_1, \dots, \omega_\Omega$, что $V_{A_j} = \emptyset$. Это означает, что вершины $A_{\omega_1}, \dots, A_{\omega_\Omega}$ являются входными параметрами и

значения других вершин в принципе могут быть выражены через значения этих входных вершин, то есть $A_j = F_j(A_{\omega_1}, \dots, A_{\omega_\Omega})$, $j \neq \omega_1, \dots, \omega_\Omega$, где F_j – некоторая, в нашем частном случае, линейная функция.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Система (A, E) является согласованной, если функции F_j определены для всех j .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Степенью влияния входной вершины с номером ω_k на вершину с номером j называется величина $|\partial F_j / \partial A_{\omega_k}|$.

Теперь получим более конкретные выражения для введенных понятий. Рассмотрим матрицу смежности $\{a_{ij}\}$ орграфа A , где a_{ij} являются весами ребер, идущих от вершины с номером i , к вершине с номером j . Если $a_{ij} = 0$, то вершины в данную сторону не связаны. В рассматриваемом нами линейном случае для вычисления значений A_j используется механизм аддитивной свертки, то есть вычислительная система на графе A задается соотношениями:

$$A_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} A_i, \quad j = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Пусть для $j = 1, \dots, n_1$ $a_{ij} = 0 \forall i$. То есть для вершин A_j , $j = 1, \dots, n_1$ нет входящих ребер, и эти вершины являются входными. Их значения можно задать произвольно. Выделим эти вершины и, сгруппировав значения, получим из (1)

$$\sum_{i=n_1+1}^N (\delta_{ij} - a_{ij}) A_i = \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij} A_i, \quad j = n_1 + 1, \dots, N, \quad (2)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера.

Введем обозначения $\alpha_{ij} \equiv \delta_{ij} - a_{ij}$, $\{\alpha_{ij}\} \equiv \Lambda$, $i, j = n_1 + 1, \dots, N$; $R_j \equiv \sum_{i=1}^{n_1} a_{ij} A_i$, $j = n_1 + 1, \dots, N$; $m \equiv N - n_1$. Тогда, возможно, проведя перенумерацию, (2) можно переписать в виде

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{ij} A_i = R_j, \quad j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Отметим, что система (3), а значит, и исходная система (1) разрешима, если $\det \Lambda \neq 0$. То есть ненулевой $\det \Lambda$ определяет согласованность системы в соответствии с Определением 1. Далее всюду будем предполагать, что $\det \Lambda \neq 0$.

Теперь сформулируем несколько известных естественных определений, которые необходимы для вычисления степени влияния входных вершин на другие вершины в соответствии с Определением 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Одинарным циклом длины K назовем последовательность вершин $A_k, k=1, \dots, K+1$ с различными i_k при $k \neq K+1$, $\{i_k\} \subset \{1, \dots, N\}$, такую что $a_{i_k i_{k+1}} \neq 0, k=1, \dots, K$ и $i_{K+1} = i_1$.

Будем рассматривать матрицу $\{\alpha_{ij}\}$ как матрицу смежности графа \hat{A} , полученного из A . А именно, граф \hat{A} состоит из вершин $\{A_i, i=1, \dots, m\}$, то есть из тех вершин исходного графа A , которые не являются входными. Соответствующие ребра графа A сохраняются и в \hat{A} и, кроме того, вследствие вида α_{ij} значения $\alpha_{ii}, i=1, \dots, m$, вообще говоря, не равны нулю, так что \hat{A} имеет связь каждой вершины с самим собой, т.е. петли.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 4. Разбиением множества $\{1, \dots, m\}$ на циклы по отношению к графу \hat{A} назовем такой набор множеств $I_l \subset \{1, \dots, m\}, l=1, \dots, L$; $I_{l_1} \cap I_{l_2} = \emptyset, l_1 \neq l_2$; $\bigcup_{l=1}^L I_l = \{1, \dots, m\}$; L – число циклов в разбиении, что $\forall l \{A_i, i \in I_l\}$ является циклом в \hat{A} .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 5. Весом пути от вершины A_i до вершины A_j в графе \hat{A} (то есть последовательности ориентированных ребер, не содержащей внутренних циклов и соединяющей A_i и A_j) называется произведение весов всех ребер графа \hat{A} , входящих в путь. Если $i = j$, то вес такого пути называется весом получившегося одинарного цикла (cycle or simple circuit).

Определим функции F_j для вычисления степени влияния в соответствии с Определением 2, то есть решим систему уравнений (3). Решение системы (3) можно найти по формулам Крамера $A_i = \det \Lambda_i / \det \Lambda, i=1, \dots, m$, где Λ_i представляет собой матрицу Λ , в которой строка i заменена вектором $\{R_j\}$. Вектор $\{R_j\}$ содержит линейную комбинацию значений вершин, являющихся входными для исходного графа A , будем обозначать их $\bar{A}_l, l=1, \dots, n_1$. В соответствии с формулами Крамера находим

$$A_i = \frac{\det \Lambda_i}{\det \Lambda} = \sum_{l=1}^{n_1} \frac{F_{il}}{\det \Lambda} \bar{A}_l, \quad (4)$$

где F_{il} являются некоторыми коэффициентами, зависящими от значений элементов матрицы смежности $\{a_{ij}\}$ исходного графа A .

То есть в соответствии с Определением 2 $|F_{il} / \det \Lambda|$ является степенью влияния входной вершины \bar{A}_l на вершину A_i . Вследствие того, что в (4) $\det \Lambda$ входит в коэффициент влияния для всех i , при сравнении степени влияния его можно не учитывать. Тем более что ниже мы будем использовать

нормированный коэффициент влияния, а именно отношение $|F_{il}| / \max_{(i,l)} |F_{il}|$ – в этом случае величина $\det \Lambda$ также не важна. Сформулируем теперь правило вычисления коэффициента F_{il} в зависимости от топологии графа A , см. также [11]. Строгое доказательство этого правила и связанные с этим математические построения содержатся в [15].

Рассмотрим граф \hat{A}_{i+} , отличающийся от \hat{A} тем, что элемент A_i связывается со всем другими вершинами, если такой связи не было в графе \hat{A} . Из дальнейшего будет ясно, что веса новых ребер не важны, важно только наличие связи. Для определения коэффициента F_{il} , характеризующего степень влияния входной вершины \bar{A}_i на другую вершину A_i , необходимо применить следующую последовательность действий.

Построим граф \hat{A}_{i+} из графа A . Найдем все разбиения на циклы графа \hat{A}_{i+} . Хотя бы одно разбиение всегда существует, т.к. в соответствии со структурой графа \hat{A} каждая его вершина образует петлю. Коэффициент F_{il} вычисляется как сумма мономов весов, каждый из которых соответствует одному разбиению на циклы. Вес монома конструируется в два этапа: 1) перемножаются веса всех дуг, входящих в данное разбиение на циклы и вычисляется знак, равный $(-1)^{m+L}$, где m – количество КСС в графе \hat{A}_{i+} , а L – количество циклов в рассматриваемом разбиении; 2) в полученном мономе определяется цикл, содержащий КСС A_i , и величина α_{is} заменяется на величину a_{is} из матрицы смежности первоначального графа A .

Далее перейдем к построению и анализу упрощенной модели развития региона на примере Калининградской области на основе описанного показателя «степень влияния» (см. Определение 2).

3. Построение и исследование модели развития Калининградской области

Для построения модели были использованы доступные данные Росстата. Общий вид получившегося графа показан на рис. 1, пояснения к рисунку приведены ниже. Основные отрасли деятельности для Калининградской области были выбраны на основании таблицы «Структура валового регионального продукта (ОКВЭД 2)». На сайте Росстата были представлены данные по процентной структуре ВРП субъектов федерации за 2016-2020 годы. Эти данные были усреднены и выбраны те области деятельности, чья доля в ВРП превышала 5%. Дополнительно были добавлены виды деятельности, чья доля превышала 3% и темпы роста которых превышали 10%. Влияние факторов друг на друга было оценено исходя из таблицы «Таблица ресурсов и использования товаров и услуг РФ за 2019 год». А именно, для каждого рассматриваемого фактора (который соответствовал виду деятельности из

выбранных для Калининградской области) оценивалась доля продукции от других видов деятельности, используемой видом деятельности, соответствующим рассматриваемому фактору. Полученные доли и использовались в качестве весов соответствующих ребер. Поскольку таблицы данного вида были доступны только для РФ, то специфика Калининградской области учитывалась только тем, что часть продукции относилась к внешним, входным, факторам и, соответственно, значительная доля влияния оказывалась извне, т.к. Калининградская область представляет собой анклав. Еще раз подчеркнем, что модель носит методологический характер. Ниже мы покажем, какого рода утверждения можно делать на основе подобных рассмотрений. Для построения ответственной модели необходимы детализированные данные по выбранным регионам за относительно большой (например, 10 лет) период времени с, например, недельным шагом. Детализация касается данных по расширенному списку видов деятельности, по выпуску и потреблению полного набора видов продукции, включению данных по отдельным предприятиям и т.п. Тогда такие данные можно обрабатывать в соответствии с методологией искусственного интеллекта и строить гораздо более сложные, но и более реалистичные модели развития регионов на основе нечетких когнитивных карт.

Однако рациональную модель можно построить даже и на том минимуме данных, о котором сказано в начале данного раздела. В этом состоит определенное преимущество данного вида моделей, особенно в условиях хронического недостатка входной информации.

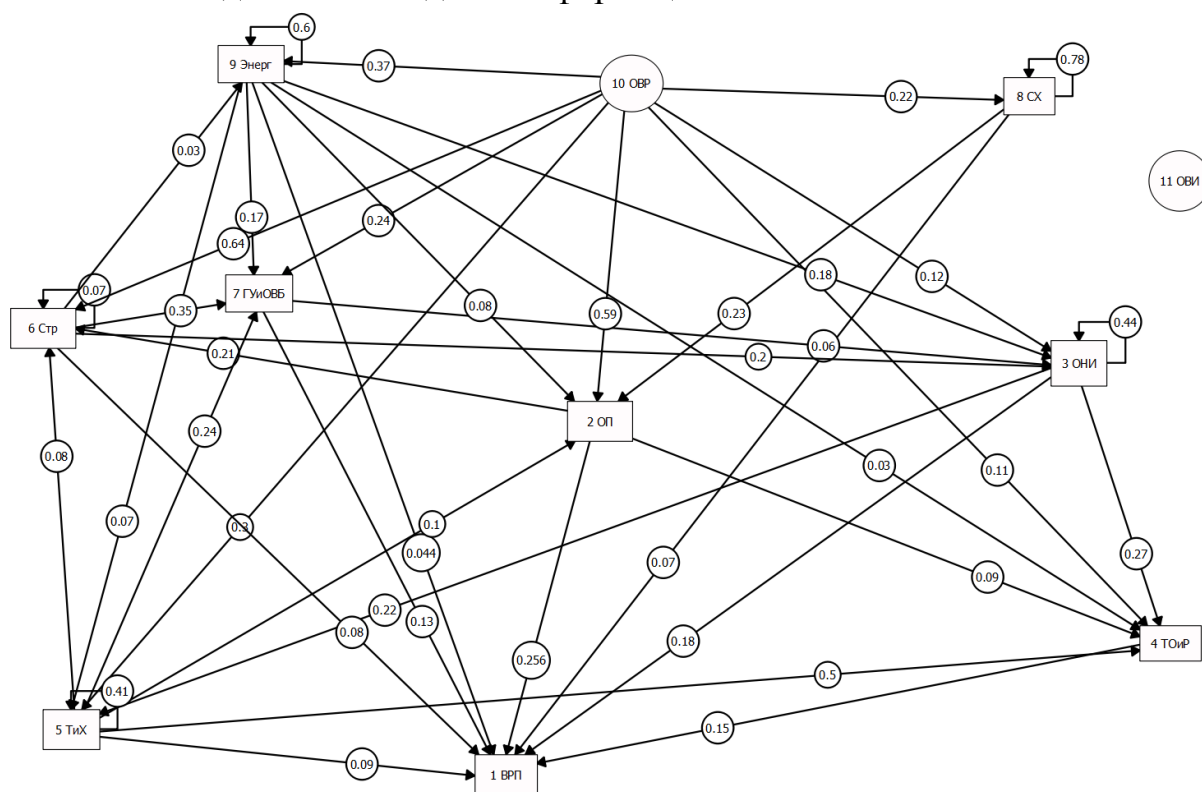


Рис. 1. Пример модели развития региона на основе когнитивной карты

Приведем расшифровку обозначений вершин (факторов) на рис. 1. Входные факторы обозначены кружком, остальные факторы – прямоугольниками. Фактор 1 (см. расшифровку ниже) будет считаться целевым фактором. Все факторы, кроме входных и целевого, представляют собой виды деятельности по ОКВЭД. А именно,

- 1 ВРП – Валовой региональный продукт;
- 2 ОП – Обрабатывающие производства;
- 3 ОНИ – Деятельность по операциям с недвижимым имуществом;
- 4 ТОиР – Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов;
- 5 ТиХ – Транспортировка и хранение;
- 6 Стр – Строительство;
- 7 ГУиОВБ – Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение;
- 8 СХ – Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство;
- 9 Энерг – Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха;
- 10 ОВР – Объем внешних рынков;
- 11 ОВИ – Объем внутренних инвестиций.

Предварительно отметим, что схема рис. 1 содержит довольно много нетривиальных циклов (т.е. циклических путей в графе, состоящих из трех и более вершин), а именно: тройных 6-9-2; 5-6-9; 3-5-6; 7-3-5; четверных 7-3-5-6; 5-2-6-9; 3-5-2-6; пятерных 7-3-5-6-9; 3-5-2-6-9; 7-3-5-2-6; шестерной цикл 7-3-5-2-6-9. В соответствии с работой [15] это определяет нетривиальное распространение влияния от входных факторов к целевому.

На схеме рис. 1 внутренние факторы зависят только от одного внешнего фактора – объема внешних рынков. Мы будем интересоваться следующим вопросом: какие факторы следует сделать зависимыми от объема внутренних инвестиций, чтобы заметно уменьшилось влияние внешних рынков на валовой региональный продукт? То есть какие виды деятельности следует развивать, чтобы уменьшить зависимость от внешних поставок? Для этого будем модифицировать схему рис. 1, заменяя некоторые стрелки, идущие от фактора 10, на стрелки, идущие от фактора 11. При этом веса стрелок сохраняются. Далее будем вычислять влияние факторов 10 и 11 на другие факторы в соответствии с Определением 2, а также будем нормировать их величину на величину максимального влияния факторов. Таким образом, величины влияния будут располагаться на отрезке $[0,1]$.

В табл. 1 показана рассчитанная степень влияния входных факторов 10 и 11 на целевой фактор 1 и на два других фактора 7 и 8. Расчеты приведены для трех вариантов: связи 10 – 2, 10 – 6 заменяются на связи 11 – 2, 11 – 6 с сохранением весов (остальные связи неизменны); аналогичная процедура применяется независимо к связям 10 – 8, 10 – 9 и далее к связям 10 – 3, 10 – 4. В табл. 1 названия столбцов связаны с входными факторами, а названия строк с

факторами, на которые оказывается влияние. Фактор 8, отвечающий за сельское хозяйство, выбран потому, что влияние на него оказывается максимальным (после нормировки величина влияния равна 1) вследствие определенной его «изолированности» (он не включен ни в какие циклы) на схеме рис. 1.

Таблица 1

Степень влияния входных факторов на целевой и некоторые другие факторы в модели развития региона

| | Вариант 1 | | Вариант 2 | | Вариант 3 | |
|----------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | 11 – 2 , 11 – 6 | | 11 – 8 , 11 – 9 | | 11 – 3 , 11 – 4 | |
| | 10 ОВР | 11 ОВИ | 10 ОВР | 11 ОВИ | 10 ОВР | 11 ОВИ |
| 1 ВРП | 0,62 | 0,38 | 0,64 | 0,36 | 0,92 | 0,08 |
| 7 ГУиОВБ | 0,66 | 0,34 | 0,75 | 0,25 | 0,98 | 0,02 |
| 8 СХ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

КОММЕНТАРИЙ к табл. 1. Вначале рассмотрим Вариант 1. Факторы 2 (обрабатывающие производства) и 6 (строительство) являются видами деятельности, на которые первоначально фактор внешнего воздействия 10 оказывает наибольшее влияние. Поэтому переключение факторов 2 и 6 на зависимость от фактора внутренних инвестиций 11 должно дать желаемое снижение зависимости от внешних рынков. Это и наблюдается в первых двух колонках табл. 1, при этом дополнительно включенный в рассмотрение фактор 7 – государственное управление и военная безопасность – сохраняет достаточную долю автономии, что важно для анклава. Однако с экономической точки зрения для переключения обрабатывающих производств и строительства с внешних источников на внутренние может потребоваться значительный объем инвестиций, что может быть затратно. Рассмотрим тогда Вариант 2. Переключим на внутренние источники факторы 8 (сельское хозяйство) и 9 (энергетическое обеспечение). Совокупное влияние фактора внешних рынков на них значительно меньше, чем на предыдущие два фактора, что предполагает необходимость меньшего инвестиционного ресурса. Однако в отношении ВРП мы получаем практически такую же долю автономии, как и для Варианта 1. Несколько снижается доля автономности фактора 7, но все равно остается на достаточном уровне. Теперь рассмотрим Вариант 3. Может быть, удастся еще уменьшить необходимый уровень инвестиций, если переключить на внутренние источники факторы 3 и 4, на которые изначально уровень влияния фактора 10 невысок. Табл. 1 показывает, что в этом случае заметно снизить зависимость от внешних источников не удастся. Мало того, появляется высокая зависимость фактора безопасности 7 от внешнего мира, что представляет определенный риск для анклава. Таким образом, наиболее предпочтительным вариантом осуществления внутренних инвестиций является Вариант 2. Конечно, можно рассмотреть и другие сочетания факторов и влияний, поэтому

полученный результат ни в коей мере не является практической рекомендацией, а лишь иллюстрирует методологию описания ситуации и характер информационной процедуры, облегчающей принятие решений уполномоченным лицом.

4. Заключение

В данном препринте рассмотрена одна из возможных методологий, облегчающая процесс принятия решений в ситуации высокой неопределенности и недостатка данных. Методология основана на технике построения нечетких когнитивных карт и численной оценке влияния различных факторов друг на друга. Так как в основе построения лежит ориентированный граф, то можно рассмотреть и любые другие характеристики из теории графов и когнитивных подходов, см., например, [16], для структурирования сложных систем. В принципе предлагаемый подход требует минимальных точных данных и может использовать должным образом обработанные экспертные оценки. Однако для более-менее точного воспроизведения функционирования сложных систем все же необходим большой объем данных с достаточной степенью детализации. Это позволит включить данную методологию в орбиту техник искусственного интеллекта, например, рассматривать произвольный граф как расширение понятия нейронной сети.

Подобные оценки можно делать для воздействия факторов любой природы, особенно для появляющихся в критических ситуациях, например, фактор возникновения пандемии COVID-19, см. [13], фактор роста экологических требований к получаемой энергии, фактор появления геополитической напряженности, см. [11] и т.п. Однако тому типу рассуждений, который проиллюстрирован в настоящем препринте, свойствен свой особый язык интерпретации и своя математическая техника, которые необходимо осваивать. Оценка полезности предлагаемого языка остается за специалистами в области наук о развитии общества как в экономическом его аспекте, так и в политическом, а также в более общем, гуманитарном.

Библиографический список

- [1] Рыков Ю.Г. Пандемия COVID-19 как фактор изменений трендов в прогнозах мировой энергетики // Энергетическая политика. — 2021. — № 8. — С. 6 – 17.
- [2] Широ́в А.А., Янто́вский А.А. Межотраслевая макроэкономическая модель RIM – развитие инструментария в современных экономических условиях // Проблемы прогнозирования. — 2017. — № 3. — С. 3 – 18.
- [3] Антипов В.И., Митин Н.А., Пащенко Ф.Ф. Макроэкономическая имитационная модель развития России // Препринты ИПМ им.

- М.В. Келдыша. — 2017. — № 142. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-142>.
- [4] Общие принципы прогнозирования социально-экономических показателей // Рейтинговое агентство АКРА. — 2017. — URL: <https://www.acra-ratings.ru/upload/iblock/b25/hx3j18p49tnoqn6h7zkm7bl5jvdkg5ta.pdf>.
- [5] Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. — 2007. — № 1. — С. 37 – 40.
- [6] Дранко О.И., Логиновский О.В., Приказчиков С.А. Модель влияния кризиса на доходы регионального бюджета: анализ Челябинской области // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». — 2021. — Т. 21. — № 1. — С. 90–101.
- [7] Kosko B. Fuzzy cognitive maps // Int. J. Man-Mach. Studies. — 1986. — V.24. — P. 65 – 75.
- [8] Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. — 1992. — 575 P.
- [9] Kosko B. Fuzzy thinking: The new science of fuzzy logic. Hyperion, 1993, 336 P.
- [10] Dranko O.I., Rykov Yu.G., Karandeev A.A. Structural analysis of large-scale socio-technical systems based on the concept of influence // IFAC-PapersOnline. — 2021. — V. 54. — Issue 13. — P. 738 – 743.
- [11] Рыков Ю.Г. Технология использования нечетких когнитивных карт с математической точки зрения // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2021. — № 73. — URL: https://keldysh.ru/papers/2021/prep2021_73.pdf.
- [12] Карандеев А.А. и др. Программный модуль для конструирования и расчета когнитивных карт Graph Explorer // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. — № 2022614193. — 17.03.2022.
- [13] Осипов В.П., Рыков Ю.Г., Четверушкин Б.Н. Математические аспекты понятия влияния в концепции когнитивного моделирования // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2021. — № 2. — С. 3 – 10.
- [14] Четверушкин Б.Н., Судаков В.А. Факторная модель для исследования сложных процессов // ДАН. — 2019. — Т.489. — № 1. — С. 17 – 21.
- [15] Osipov V.P., Rykov Yu.G. On mathematical aspects of analyzing the structure of complex systems using weighted digraphs // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2020. — 41. — No.11. — P. 2231 – 2238.
- [16] Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС. — 1995. — 228 С.