

НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Симонов А.Б., Симонова И.Э.

Волгоградский Государственный Технический Университет, Волгоград, Россия

absimonov@gmail.com, simonova-vstu@mail.ru

Аннотация. Для экономических процессов характерны резкие, системные изменения в динамике процессов и моделях взаимосвязей. Особая роль подобных периодов в динамике требует развития инструментария, который позволит как обнаруживать изменения и управлять рисками, так и обеспечивать гибкость экономических систем и закладывать условия для развития ростков будущих изменений.

Ключевые слова: прогнозирование, изменение динамики, моделирование динамики, экономические процессы.

Введение

Одним из важнейших источников информации для принятия решения являются результаты прогнозирования. Они позволяют учесть возможные изменения в объекте управления и во внешней среде к моменту окончания реализации решения и оптимизировать долгосрочный эффект от принятого решения. Особую важность вопросы прогнозирования имеют в экономике. Это связано с наличием больших лагов при реализации многих решений, нестационарностью временных рядов в экономике, наличием помех и сезонных колебаний. Более того, процесс прогнозирования затрудняют свойства экономики как открытой системы, такие как неустойчивость; адаптивность; наличие многочисленных сложных взаимосвязей между элементами экономической системы, часто образующих циклические структуры. Эти свойства наиболее активно проявляются в период кризисов [1], однако база их закладывается в ходе всего функционирования экономических систем. Особенно характерно влияние таких свойств в отдельных областях экономики, в первую очередь, связанных с инновационным развитием.

В данной статье предпринята попытка рассмотреть поведение экономических систем в период кризисов и инновационных изменений на конкретных примерах и оценить возможность применения различного инструментария прогнозирования и управления в целом с учетом свойств экономики как открытой системы.

1. Нелинейность и изменения как неотъемлемая часть экономических процессов

Моделирование временных рядов в экономике часто опирается на их аппроксимацию при помощи регрессионных моделей, на кусочно-линейную аппроксимацию и аппроксимацию сплайнами. Также широко применяется выявление закономерностей изменения экономических явлений во времени при помощи интеллектуальных методов, в первую очередь, нейронных сетей. При этом значительные отклонения от полученных моделей рассматриваются либо как аномалии, либо как начало изменения моделируемых тенденций. Традиционно вопросы обнаружения аномалий и смены тенденции рассматриваются как второстепенные по отношению к вопросам выявления долгосрочного тренда и периодических колебаний, что ставит под вопрос основы применения моделей в целом. Ведь если мы не можем оценить, верны ли параметры модели или она должна быть перестроена, то и сама модель не несет объективного знания, а всегда требует присутствия субъективного мнения аналитика. Он становится необходимой «частью» модели, и выполняет функции субъективной оценки корректности фундаментальных предпосылок моделирования и сохранения смысла технических параметров модели. В свою очередь, это лишает принятие решений в управлении экономическими системами объективного базиса для проведения анализа и оптимизации.

Надо отметить, что нелинейность всегда была неотъемлемой частью многих экономических моделей. Более того, в последнее время растет количество работ, посвященных классификации аномалий [1] и развитию инструментов их выявления (обзор таких инструментов дан, например, в работе [2]). Также развиваются методы выявления изменений в параметрах модели (методы анализа изменений change detection).

Эти инструменты позволяют (обычно с определенным лагом) оценить необходимость учета уже произошедших изменений и внести корректировки в построенную модель или в интерпретацию конкретных значений. Однако данный подход тоже не является панацеей, ведь он основывается на том, что изменения в динамике экономических процессов заданы внешними условиями. Однако часто разумно предположить, что нелинейность и изменения вытекают из деятельности самих

экономических объектов, носят системный характер, а также приводят к системным изменениям в объекте управления. Более того, упомянутая выше адаптивность позволяет экономическим системам подстраиваться к происходящим изменениям за счет изменений параметров и взаимосвязей между экономическими объектами, что также должно учитываться при принятии решений.

Особенно важен учет системной сущности аномалий, а также нелинейности и изменений тренда в управлении инновационной деятельности на макроуровне и на уровне регионов. В этой области изменения во многом возникают внутри инновационной системы, происходят достаточно часто и носят радикальный характер. Также важно понимание системной сути изменений динамики при изучении кризисных периодов. Поэтому в нашей работе мы рассмотрим примеры таких изменений динамики конкретных инновационных и кризисных процессов и попытаемся сделать общие выводы о характере этих изменений.

2. Изучение динамики курса рубля и цен на нефть на фоне коронакризиса в 2020 году

Одним из самых заметных кризисов в последние годы стал коронакризис. Возросшая нагрузка на медицину и социальную сферу, локдаун, снижение объемов перевозок, кризис в сфере общественного питания и туристической индустрии, массовое внедрение технологий удаленной работы и цифровых двойников, возросший объем исследований в медицине и фармацевтике – вот лишь небольшая часть экономических следствий пандемии. Надо отметить, что он привел и к значительному объему внедрения инноваций в экономике – распространению удаленной работы, индивидуальных средств передвижения (электросамокатов и велосипедов) и так далее.

Очевидно, что это привело к значительным и резким изменениям многих экономических показателей. Например, в апреле 2020 года впервые в истории [3] фьючерс цен на нефть упал ниже нуля, что было вызвано резким падением потребления нефти в период локдауна и прогнозируемым переполнением хранилищ нефти. В этих условиях интересно проследить динамику экономических процессов в российской экономике и оценить, сохранили ли они связи, установившиеся в докризисный период. Мы проанализировали динамику цен на нефть и курса рубля в 2020 году, исходя из предположения о тесной зависимости между этими показателями. В качестве источника информации брались данные Банка России [4] и данные сайта Investing.com[5] о спотовой цене нефти Urals.

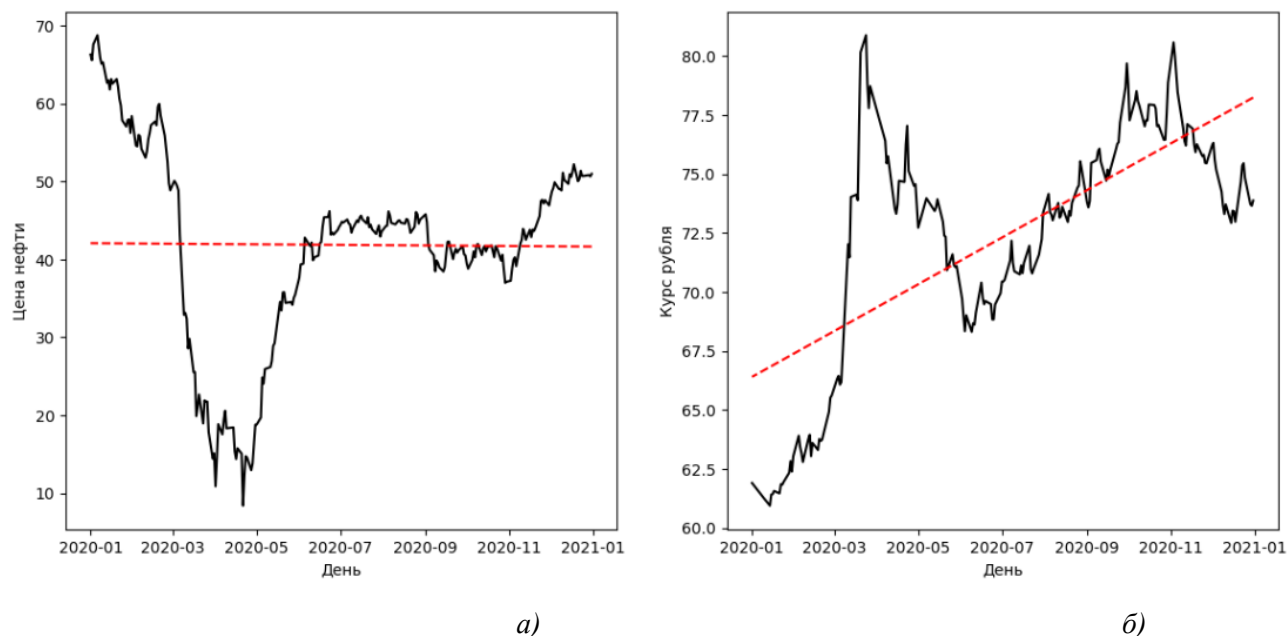


Рис. 1. Динамика цен на нефть (а) и курса рубля (б) в 2020 году

Динамика цен на нефть и курса рубля представлена на рис.1. Как видим, динамика обоих процессов имеет значительные отклонения и неоднократные изменения тенденций, что характерно для кризисных периодов. Особо выделяются резкое снижение цен на нефть и падение курса рубля во время локдауна с марта по май 2020. При этом цены на нефть к концу года стабилизировались, а курс рубля имел тренд к снижению (увеличению стоимости доллара в рублях). Посмотрим, сохранилась ли в условиях таких резких изменений связь между данными показателями (см. рис. 2)

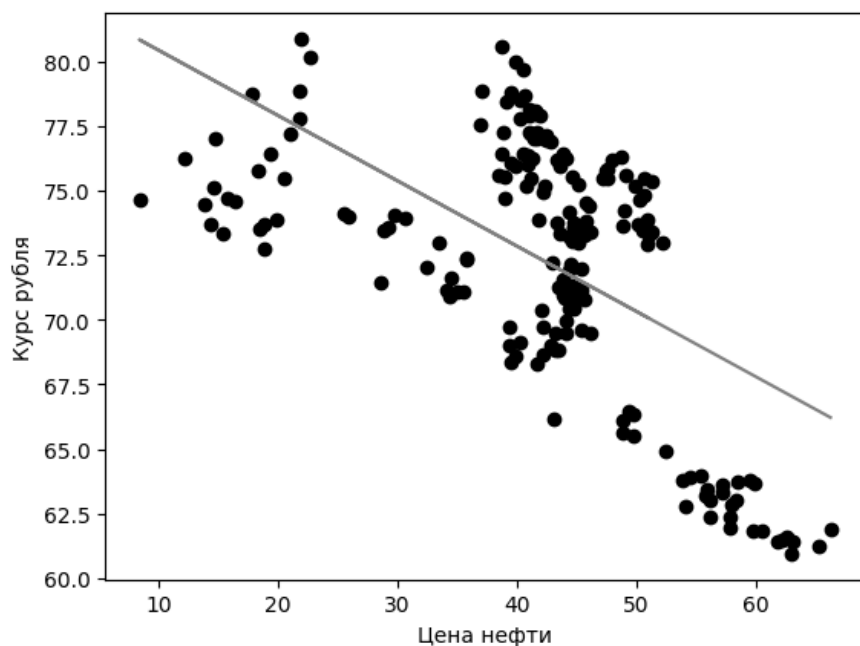


Рис. 2. Взаимосвязь цен на нефть и курса рубля в 2020 году

Как видим из рис. 2, в 2020 году сохранялась связь, близкая к линейной, между ценой на нефть и курсом рубля. Значение $R^2=0,348$ ($r=0,590$) показывает, что теснота связи средняя (согласно шкале Чеддока). Уравнение связи $y=82,96-0,25*x+\varepsilon$ показывает, что с ростом цен на нефть курс рубля укрепляется (на 25 копеек за доллар с изменением цены на 1 доллар за баррель нефти). Однако визуально видно, что облако точек значительно рассеяно вдоль линии регрессии. Поэтому рассмотрим, как изменение связи между данными показателями происходило во времени (см. рис. 3).

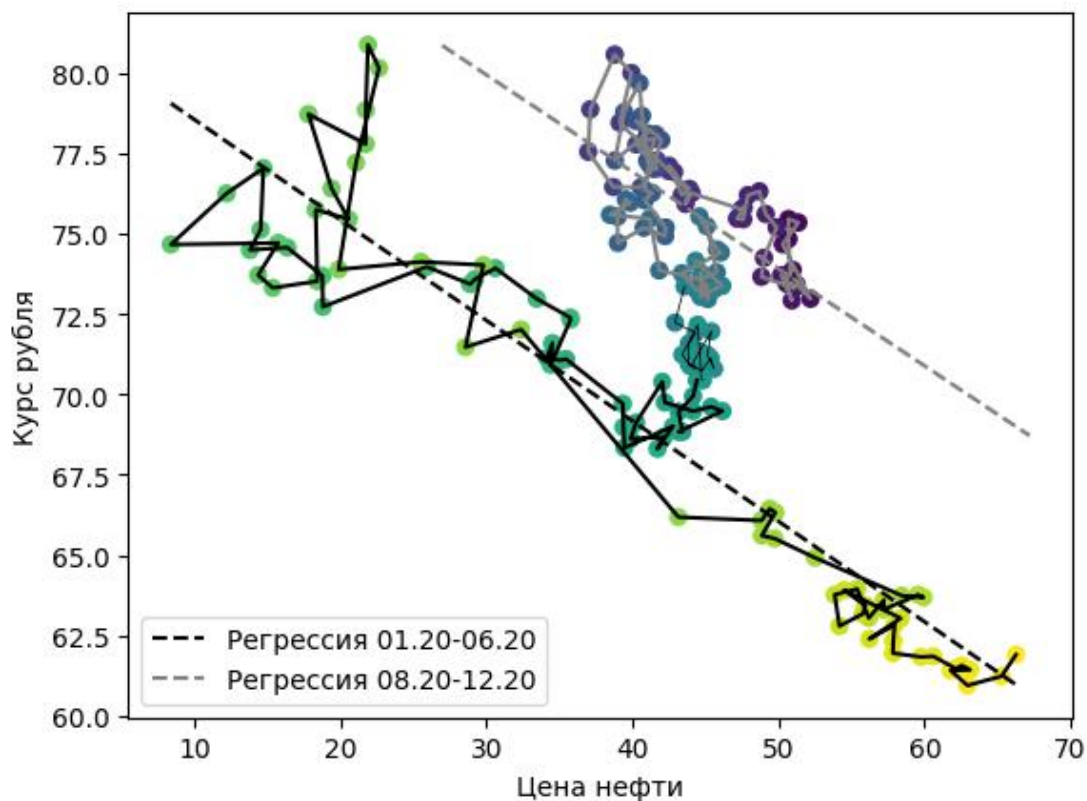


Рис. 3. Изменение взаимосвязи цен на нефть и курса рубля в 2020 году

На рис. 3 точками отражены данные о цене на нефть и курсе рубля за те даты, когда есть информация по обоим показателям. Линией отражена последовательность изменения показателей. Точки,

относящиеся к началу года, более светлые (начиная с расположенных в правом нижнем углу); более темные точки соответствуют более поздним датам. На рисунке мы видим четкую картину, выявляющую три разных периода: первую половину года, переход и вторую половину года. Можно считать, что в первую половину года (несмотря на локдаун) происходило сохранение системных свойств экономики. Вплоть до 1 июля 2020, несмотря на значительные кризисные явления, мы видим проявление очень тесной связи между ценой нефти и курсом рубля. Значение $R^2=0,890$ показывает очень тесную связь. Уравнение связи $y=81,68-0,31*x+\varepsilon$. Коэффициент при x близок к значению, которое мы наблюдали в целом за год. В июле происходило системное изменение, заключающееся в падении курса рубля при неизменных ценах на нефть. В этот период теснота связи низкая, $R^2=0,161$, однако, как не странно, коэффициент при x почти не изменяется (при всей его низкой значимости). С 31 июля связь стала описываться новым линейным уравнением $y=89,00-0,30*x+\varepsilon$ с примерно тем же углом наклона, но с повышением стоимости доллара примерно на 6 рублей 30 копеек. Значение $R^2=0,430$ показывает умеренную связь, несколько более высокую, чем в целом за год.

Отметим, что при изучении динамики (см. рис. 1) июль – период качественных изменений – скорее, оказался одним из немногих стабильных периодов года. Однако изменения, заложенные в этот период, внесли важнейший вклад в итоговую динамику явлений за год. Если мы будем учитывать в модели динамики курса рубля только переход, произошедший в июле, предположив отсутствие тренда в оставшиеся периоды, то получим модель с коэффициентом $R^2=0,371$. При этом если мы построим линейную модель для этого же показателя, то для нее $R^2=0,348$, что сравнимо по тесноте связи.

Таким образом, опираясь только на объективно созданные линейные модели, мы не можем построить полную картину динамики изучаемых процессов во времени. Конечно, мы можем использовать кусочно-линейную аппроксимацию, но моменты смены модели в этом случае должны определяться специальными методами, экспертные (а значит субъективные) или основывающиеся на алгоритмах анализа данных (по своей логике нелинейных).

Парадоксальной кажется ситуация, что в период острых кризисных изменений, вызванных внешними факторами (пандемией коронавируса) связи в экономической системе демонстрировали столь стабильный характер. При этом, период относительной стабильности в середине 2020 года сопровождался внутренними изменениями в характере связей между экономическими показателями. Эти внутренние изменения, даже если мы не будем учитывать всех огромных внешних воздействий, в достаточной степени успешно описывают динамику изучаемых показателей за год в целом. Это говорит о важности учета внутреннего состояния системы и взаимодействия факторов в ней, а также о важности предсказания и управления системными изменениями.

3. Инструментарий управления в условиях нелинейных внутренних изменений

Закономерности, подобные рассмотренной выше, часто могут наблюдаться при изучении изменения во времени связей, наблюдаемых внутри различных экономических подсистем. Здесь можно привести примеры моделей распространения инноваций, основанные на дифференциальных уравнениях, в частности, отраженные в работах Ф. Басса, А.В. Садовниченко и А.А. Акаева, В. Л. Бабурина и С. П. Земцова. В целом, логистическая функция, которая является предтечей таких моделей, при определенных условиях может приводить даже к хаотической динамике. В целом, нелинейные модели в экономике мы можем увидеть при моделировании создания инноваций (в частности, модель Эрроу-Ромера), при изучении монополизации рынка и так далее. Все эти модели объединяет одно – нелинейность их поведения и резкие изменения вызываемые не столько внешними, сколько внутренними факторами.

Внешние изменения, даже существенные, часто вызывают лишь отклонения с последующим возвратом к исходному тренду (хотя в долгосрочной перспективе нельзя отрицать влияния системной интеграции региона в надсистемы, например, MAR-эффекты и глобализацию). С другой стороны, качественные внутренние изменения, занимающие малое время и, на первый взгляд, слабо влияющие на динамику изучаемых процессов, могут ключевым образом влиять на течение того или иного экономического процесса. Это роднит экономические процессы с процессами, описываемыми теорией катастроф. При этом краткосрочные прогнозы могут быть достаточно эффективными, однако в среднесрочной перспективе разумно ожидать системных изменений, которые значительно снизят качество сделанных прогнозов. Особенно это касается периодов кризисов, а также инновационной сферы экономики.

При управлении экономическими системами с учетом таких особенностей могут рассматриваться два подхода. При первом подходе подобные изменения можно принимать как некую данность. Исследователь стремится диагностировать изменения и изменять управляющее воздействие, а также

применять методы управления рисками – создавать резервы, диверсифицировать виды деятельности и даже отказываться от наиболее рискованных видов экономической деятельности. Этот подход позволяет опираться на традиционный инструментарий теории оптимизации. К достоинствам этого подхода можно отнести высокую степень оптимизации при сохранении долгосрочных тенденций; возможность описать алгоритм принятого решения; лучшую верифицируемость принятых управленческих решений. Недостатком данного подхода в условиях частых изменений является необходимость создавать излишние резервы, связанные со всеми видами рисков; необходимость многократно перестраивать оптимизационные модели, эффективность которых снижается в связи с лагом при принятии решений; необходимость непропорционально более сильной реакции на уже сложившиеся изменения по сравнению с управлением изменениями в процессе их возникновения.

При втором подходе изменения рассматриваются как результат, в первую очередь, функционирования самой экономической системы. Более того, для экономики важным является то, что ее объекты являются активными, преследуют свои цели и способны сами генерировать изменения. Это приводит к необходимости оперативно создавать «правила, нормативы институционального управления в сфере применения высоких технологий»[7] и в других областях, для которых внутренняя среда является важным источником изменений. При этом изменения значений признаков у элементов системы и связей между ними могут учитываться и прогнозироваться, однако в первую очередь используются инструменты повышения гибкости, развития разнообразия внутри системы, поддержки механизма самоорганизации. Особо распространены подобные инструменты в инновационной сфере, где широко используются технопарки, венчурные фонды, внутренние биржи идей на предприятиях. При этом закладываются основы для развития ростков изменений и наблюдения за их развитием. Достоинствами данного подхода является обеспечение большей гибкости систем и большей эффективности в условиях значительных изменений. Недостатки связаны, в первую очередь, со сложностью постановки задачи управления при таком подходе – по сути, вопросы оптимизации передаются на уровень подсистем экономической системы, которые часто не имеют достаточного инструментария для эффективного решения задач оптимизации, а также имеют свои цели, которые могут отличаться от целей надсистемы. Более того, во многих областях (в частности, в инновационной сфере) развитие изменений происходит нелинейно. Например, рост в модели Басса, описывающей внедрение нового товара, на ранних этапах близок к экспоненциальному. А это, в свою очередь, приводит к существенной чувствительности к начальным значениями, что значительно усложняет управление¹. Кроме того, наличие большого количества малых элементов, за которыми необходимо наблюдать (и многие из которых не повлияют на динамику системы), значительно усложняет процесс управления на основе этого подхода.

Данные подходы при внимательном рассмотрении кажутся фундаментально отличающимися друг от друга. Мы можем даже говорить здесь о различных, формально-рационалистических и интуитивно-творческих принципах принятия решения [8]. Однако возможности современного программного и математического инструментария, как представляется, способны эффективно дополнять эти подходы и интегрировать их. В первую очередь, это инструменты математического и имитационного моделирования. Они позволяют не только смоделировать динамику системы при ожидаемых значениях показателей системы, но и оценить устойчивость системы к изменению значений параметров, а также оценить результаты изменения связей между этими параметрами. Также представляется возможным использование инструментов искусственного интеллекта, однако настроенного не столько на поиск закономерностей, сколько на поиск отклонений от них.

Еще одним перспективным направлением представляется использование комплексных алгоритмов, позволяющих использовать различные статистические инструменты и инструменты интеллектуального анализа данных. Это позволяет как выявлять и учитывать внешние отклонения, так и обнаруживать изменения внутри системы и модифицировать сами алгоритмы при таких изменениях. В качестве примеров можно привести сочетание статистических методов, нейронных сетей и генетических алгоритмов, предложенное в работе[9], или сочетание статистических методов, метода анализа сингулярного спектра и нечетких множеств, предложенное в работе[10]. Дальнейшее развитие подобного инструментария в сторону его адаптивности позволит создать базу для совмещения инструментария оптимизации и методов, направленных на обеспечение устойчивости к системным изменениям, неизбежным в долгосрочном периоде.

¹ Это может быть рассмотрено как проявления хаотической динамики в экономических системах, как это рассматривается, например, в статье [6], однако проверка на наличие элементов такой динамики кажется затруднительной.

4. Заключение

Исследование и прогнозирование динамики экономических процессов имеет значительную важность для задач управления. Однако на динамику явлений в экономике оказывают влияние как внешние факторы, так и внутренние изменения, незаметно зарождающиеся в самой системе. Учет первых особенно важен при оптимизации устойчивых экономических процессов, в то время как вторые играют особенную роль в кризисные периоды, а также в инновационных отраслях экономики. Для построения логики управления могут использоваться разнородные инструменты. Развитие компьютерных технологий позволяет надеяться на возможность организации комплексного управления динамикой экономических процессов. Такое управление позволит одновременно создавать изменения и реагировать на них.

Литература

1. *Иванюк В.А., Цвиркун А.Д., Горошникова Т.А., Шувалов К.И., Жолобова Г.Н., Смирнов М.В.* Методы управления кризисами и аномалии во временных рядах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): Труды Шестнадцатой международной конференции, Москва, 26–28 сентября 2023 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 763-767.
2. *Шкодырев В.П., Ягафаров К.И., Баитовенко В.А., Ильина Е.Э.*, Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных [Электронный ресурс] // 2017 – Режим доступа: https://ceur-ws.org/Vol-1864/paper_33.pdf
3. Цена нефти впервые в истории упала ниже нуля. Что важно знать. [Электронный ресурс]/Сайт РБК – 21.04.2020 – режим доступа: <https://www.rbc.ru/economics/21/04/2020/5e9df3249a79470ff099ae32>
4. Сайт Банка России. Динамика официального курса заданной валюты [электронный ресурс] режим доступа: https://cbr.ru/currency_base/dynamics/
5. Сайт Investing.com. Спотовая цена сырой нефти Urals - (URL-E) [электронный ресурс] режим доступа: <https://ru.investing.com/commodities/crude-oil-urals-spot-futures-historical-data>
6. *Евдокимова А. Е., Зобова Л. Л.* "Эффект бабочки" и возможность прогнозов в экономике // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 7-3. – С. 72-73.
7. *Нижегородцев, Р. М. , Русяева Е. Ю.* Методологические аспекты теории активных систем и тренды цифровизации экономики // Инновационное развитие экономики. – 2022. – № 3-4(69-70). – С. 140-148.
8. *Фон Пенци Д. Ю., Суховерхов А. В., Шутилова Ю. Ф., Хроль Е. В.* Рациональные и иррациональные факторы принятия решения и их значение для экономического прогнозирования // Эпомен. – 2019. – № 30. – С. 54-71.
9. *Иванюк, В. А., Цвиркун А. Д.* Разработка интеллектуальной системы для управления динамическими экономическими системами // Труды IX Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO '12, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, 30 января – 02 2012 года. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. – С. 317-324. – EDN SMUBIZ
10. *Rogachev A. F., Simonov A. B., Ketko N. V., Skiter N. N.* Fuzzy Algorithmic Modeling of Economics and Innovation Process Dynamics Based on Preliminary Component Allocation by Singular Spectrum Analysis Method // Algorithms. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 39.