

На правах рукописи

Кисляков Алексей Николаевич

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РЕГИОНОВ**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора экономических наук



Москва – 2022

Работа выполнена во Владимирском филиале ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»

Официальные оппоненты: **Халиков Михаил Альфредович**
доктор экономических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», профессор кафедры математических методов в экономике

Федорова Елена Анатольевна
доктор экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», профессор департамента корпоративных финансов и корпоративного управления

Трифонов Юрий Васильевич
доктор экономических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», заведующий кафедрой информационных технологий и инструментальных методов в экономике

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем рынка Российской академии наук»

Защита состоится « ____ » _____ 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.13 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 7, ауд. 414мт.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.
Телефон для справок 8 (499) 267-17-83.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.э.н.



Н.А. Кашеварова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена процессами трансформации внешнеэкономической деятельности (ВЭД) и усилении роли отдельных регионов при глобальной перестройке торговых цепочек создания стоимости товаров, что порождает необходимость исследований состояния рынков как на предмет стабильности развития, так и выявления возможностей эффективной трансформации в изменяющихся условиях внешней среды, развития внешнеторговых связей на уровне регионов за счет развития наукоемких технологий и наращивания выпуска продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Приоритетными являются задачи разработки эффективных методик анализа, оценки условий и разработки стратегии ведения внешнеэкономической деятельности региона. Для разрешения указанных противоречий необходима разработка методологии построения прогностических моделей как отдельного инструмента внедрения концепции умной специализации регионов, позволяющей выявить приоритеты для создания конкурентных преимуществ региона и сфокусировать усилия по поиску уникальной траектории развития. В этой связи наблюдается возрождение прежних и разработка новых методик описания структуры взаимодействий участников рынка и оценки устойчивости экономических связей на основе результатов анализа поведенческой активности поставщиков и потребителей продуктов, продиктованных условиями внешней среды, а также характеристик продуктов. Подобные методики позволяют создавать математические модели и автоматизированные интеллектуальные системы поддержки принятия решений.

При изучении ВЭД региона с позиции системного подхода, достижение динамического равновесия предполагает непрерывное появление новых связей, нарушающих баланс системы, что приводит к эволюционным изменениям структуры связей и установления нового равновесного состояния системы. Речь идет не только о нарушении устойчивости системы с позиции оценки результирующих показателей, но и об эффекте нарушения симметрии связей системы, который приводит к разрушению и/или глобальной перестройке структуры системы и возрождению ее в новом виде. Важным этапом исследования является прогнозирование эволюционных изменений структуры системы после нарушения симметрии внутрисистемных связей. Актуальной задачей является перспективный анализ направлений изменчивости внешнеторговых рынков и разработка, с учетом выявленных особенностей, отраслевого торгового профиля региона, позволяющего объективно оценить возможности и направления развития региональной инновационной политики. Основное противоречие состоит в том, что существующие подходы для построения прогностических моделей, ориентированы на исследовании целевых показателей, описывающих результат, что не создает предпосылок для комплексного анализа причин изменчивости при моделировании эволюционных изменений региональных внешнеэкономических связей. Указанное противоречие определяет необходимость проведения исследований в данном направлении.

Степень разработанности темы исследования. Обширный ряд научных исследований, указывает на связь процессов эволюции сложных систем с эффектом

спонтанного нарушения симметрии. Научные подходы к изучению теории симметрии и практического ее применения начались с кристаллографии в XIX веке (работы Е. С. Фёдорова и А. В. Гадолина). В работах К. Пирсона отражены фундаментальные основы изменчивости в статистическом анализе.

Вторая половина XX века – начало активного изучения и переосмысления вопросов математического моделирования сложных процессов и систем. Исследованию этих вопросов посвящены работы В.Б. Занга, Б. Мандельброта, Э. Петерса, А.И. Пригожина, Г.Г. Малинецкого, В.И. Арнольда. Научные основы искусственных нейронных сетей и направлений развития мягких вычислений, заложены в работах Т. Кохонена, М.Л. Мински, Т. Мартинца, Т. Такаги и других зарубежных ученых. Отечественная научная школа представлена работами О.И. Ларичева, А.И. Орлова, Г.С. Осипова, А.С. Птускина и др.

Значительный вклад в развитие исследований временных рядов внесли труды таких зарубежных ученых, как Х. Акаике, Д. Бокс и Г. Дженкинс, Н. Виннер и многие другие. Следует отметить и труды известных советских и российских ученых: С. А. Айвазяна, В.Н. Вапника, Л. В. Канторовича, Ю. П. Лукашина и др.

Важное прикладное развитие для анализа социально-экономических процессов принцип нарушения симметрии нашел в работах Дж. Акерлофа, М. Спенса, Дж. Стиглица: информационная асимметрия основа новой микроэкономики, частично получивший продолжение в работах Е.А. Федоровой.

Основы прогнозно-плановой работы на государственном уровне заложили выдающиеся отечественные ученые мирового уровня, к числу которых относятся Н.Д. Кондратьев, Г.А. Фельдман, В.В. Новожилов, А.Г. Аганбегян, и многие др.

Проблемам применения прогностических моделей в наукоемком производстве высокотехнологичных видов продукции и анализе внешнеэкономической деятельности посвящены работы Д.В. Александрова, А.Е. Бром, М.А. Халикова, Т.Г. Садовской, П.А. Дроговоза, С.Г. Фалько, Ю.В. Трифонова и других исследователей. Оценке сложности экономики посвящены работы Р. Хаусмана и С. Ильдаго.

Проблемам применения теории графов в анализе эволюционной изменчивости сетевых структур посвящены работы Л. Ловаса, М. Палмера, Э. Петерса, Дж. Гросса, У. Татта и др. Отечественная научная школа представлена работами О.Е. Акимова, В.К. Шитикова и С.Э. Мастицкого, В.А. Балаша, В.Г. Рау и Т.Ф. Рау и др.

Анализ существующих работ в направлении разработки методологий построения прогностических моделей показателей ВЭД определил необходимость их дальнейшего развития и совершенствования в направлении применения к анализу современных макроэкономических показателей, а также использовании системного подхода к оценке эволюционной изменчивости и устойчивости внешнеэкономических связей региона с учетом эффекта нарушения симметрии, что **обуславливает актуальность** темы диссертационного исследования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка теоретических и методологических положений построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона с учетом эффекта нарушения симметрии, обеспечивающих повышение эффективности управления ВЭД регионов. Указанная цель исследования диктует необходимость решения следующих взаимосвязанных **научных задач**:

1. Анализ современных экономических условий реализации и практики управления внешнеэкономической деятельностью регионов в условиях цифровой трансформации;

2. Анализ подходов к описанию внешнеторговых связей регионов и актуальных методологий исследования и прогнозирования показателей, характеризующих внешнеэкономическую деятельность регионов и проблем их практического применения;

3. Разработка и обоснование модифицированных подходов и экономико-математического инструментария описания эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов с учетом эффекта нарушения симметрии;

4. Разработка обобщенной методологии анализа данных и построения прогностических моделей на основе эффекта нарушения симметрии, с применением методов экономико-математического моделирования;

5. Обоснование методологических подходов, экономико-математического и программного инструментария, используемых для построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности регионов, учитывающего особенности входных данных, критерии и ограничения;

6. Верификация разработанного экономико-математического инструментария на реальных данных, характеризующих результаты внешнеэкономической деятельности регионов России;

7. Программная реализация и апробация прототипа системы поддержки принятия решений для построения прогностических моделей и проведения вычислительных экспериментов по построению прогноза показателей внешнеэкономической деятельности регионов, реализующего разработанные подходы и методы.

Объектом исследования является внешнеэкономическая деятельность регионов, формирующая динамически изменяющуюся структуру региональных экономических связей.

Предметом исследования являются научно-методические подходы прогнозирования показателей внешнеэкономической деятельности регионов для принятия управленческих решений в целях обеспечения устойчивого развития.

Методология и методы исследования. Теоретическую и методологическую основу исследования составили общенаучные методы теории систем, теории информации, абстрагирования, формализации, а также специальные методы теории принятия решений, анализа иерархий, теории графов, теории групп, мягких вычислений, нейросетевого моделирования и кластерного анализа.

Информационно-эмпирическая база диссертационного исследования формируется на основе действующих нормативных правовых актов, а также ряда аналитических отчетов, представленных органами государственной власти. Статистическая и информационная база исследования сформирована на основе официальных данных Федеральной таможенной службы за последние 7 лет. Источниками данных по внешней торговле всех стран мира является официальный сайт Всемирной торговой организации и сервис TradeMap, а также база данных UN Comtrade. При проведении расчетов использовался программный инструментарий в виде пакетов прикладных программ: MS Excel, языков программирования R и Python.

Научная проблема заключается в разработке и развитии экономико-математических методов анализа и моделей прогнозирования показателей внешнеэкономической деятельности регионов Российской Федерации с учетом эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов на основе эффекта нарушения симметрии с применением доказательной политики и методов интеллектуального анализа данных при выработке управленческих решений.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности:

1.2. Теория и методология экономико-математического моделирования, исследование его возможностей и диапазонов применения: теоретические и методологические вопросы отображения социально-экономических процессов и систем в виде математических, информационных и компьютерных моделей;

1.5. Разработка и развитие математических методов и моделей глобальной экономики, межотраслевого, межрегионального и межстранового социально-экономического анализа, построение интегральных социально-экономических индикаторов.

2.8. Развитие методов и средств аккумуляции знаний о развитии экономической системы и использование искусственного интеллекта при выработке управленческих решений.

2.10. Развитие инструментальных методов анализа механизмов функционирования рынков товаров и услуг в условиях глобализации мировой экономики и свободной торговли.

Гипотеза исследования состоит в том, что прогностические модели показателей внешнеэкономической деятельности регионов и основанная на них система поддержки принятия решений, выстроенные с учетом оценки тенденций эволюционной изменчивости и устойчивости внешнеэкономических связей позволят повысить эффективность стратегического планирования, реализовать потребности в развитии отраслей экономики и межрегиональных экономических кластеров.

Научная новизна заключается в том, что с учетом актуальной специфики стратегического прогнозирования внешнеэкономической деятельности регионов, разработан математический и программный инструментарий, отличающийся новыми подходами к изучению и описанию эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов на основе эффекта нарушения симметрии, используемый при построении прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности регионов. Часть предложенных и разработанных методов не зависит от природы объектов и может быть адаптирована для описания и конструирования моделей физических, экономических, социальных или абстрактных математических систем, обладающих свойствами симметрии.

Основные научные результаты, полученные в ходе исследования лично автором и выносимые на защиту, заключаются в следующем:

1. Разработаны и обоснованы новые подходы к описанию эволюционных изменений в структуре региональных внешнеэкономических связей, отличающиеся от существующих методов макроэкономического моделирования с использованием графовых моделей и оценкой локальной и глобальной связности сетевых структур.

2. Разработан новый подход к описанию процесса нарушения симметрии в графовых моделях региональных внешнеэкономических связей, отличающиеся оценкой степени нарушения симметрии графа на основе анализа клик в графе.

3. Разработан инструментальный метод построения графа, описывающего структуру внешнеэкономических связей, отличающийся использованием алгоритма Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) для понижения размерности и включения связей между вершинами в графах на основе обобщения признаков объектов.

4. Разработана и верифицирована методология использования нового подхода формирования графа региональных внешнеэкономических связей и оценки локальной симметрии графа для построения прогностических моделей показателей ВЭД, отличающаяся оценкой устойчивости связей в динамике с учетом внутренних особенностей и внешних условий ведения внешнеэкономической деятельности на региональном уровне.

5. Разработан метод отбора признаков, отличающийся использованием кликового коэффициента симметрии и коэффициент Джини для оптимизации глобальной структуры графа UMAP с позиции максимума информации для связанных признаков.

6. Предложена новая методика аугментации данных, отличающаяся использованием методов признаковой аугментации данных на основе оценки характеристик временных рядов показателей внешнеэкономической деятельности, кластерного анализа и рекуррентных искусственных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью.

7. Разработан инструментальный метод прогноза показателей внешнеэкономической деятельности, отличающийся использованием алгоритма понижения размерности и отбора признаков, методов аугментации данных и автоматизированного машинного обучения для выбора моделей на основе ансамблевых методов.

8. Разработан новый подход к построению рекомендаций по развитию направлений внешнеэкономической деятельности с использованием индекса выявленных сравнительных преимуществ (RCA), индекса экономической сложности (ESI) и индекса продуктовой сложности (PCI), отличающийся использованием индекса Джини продукта (PGI).

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии научных концепций и научно-методического аппарата применения эффекта нарушения симметрии, теории графов и мягких вычислений для описания эволюционной изменчивости региональных внешнеторговых связей, а также для построения прогностических моделей региональных показателей ВЭД.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в разработке, программной реализации и апробации в практической деятельности прототипа системы поддержки принятия решений по построению прогностических моделей региональных показателей ВЭД.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационного исследования реализуется за счет проведения экспериментов на корректно обработанных наборах данных, использованием современного апробированного математического аппарата, программных средств обработки информации,

достаточной сходимостью полученных результатов с реальными значениями показателей при тестировании моделей, практической реализацией и апробацией разработанных прогностических моделей и программного инструментария, обсуждением основных положений диссертации на семинарах и научных конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы диссертационного исследования докладывались на следующих международных и всероссийских научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции РАНХиГС «Перспективы повышения качества государственного управления в условиях цифровизации», Владимир 2021 г.; Ежегодной зарубежной международной научно-практической конференции «STRAREGICA», Бухарест 2021 г.; Международной научно-практической конференции «Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности», Владимир 2021 г.; Международной научно-практической конференции «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность в условиях пандемии: российский и международный опыт», Владимир 2021 г.; XIV Международной научно-практической конференции «Региональная экономика: опыт и проблемы: особенности регионального развития в условиях пандемии: проблемы и опыт», Владимир 2021 г.; Международной научно-практической конференции «Россия 2020 – новая реальность: экономика и социум», Великий Новгород 2020 г.; Первой международной научно-практической конференции «Конференция по устойчивому развитию: индустриальное будущее территорий» (IFT-2020), Екатеринбург 2020 г. IX Международной научно-технической интернет-конференции, посвященной 100-летию ДонНУЭТ «Современные тенденции развития математики и ее прикладные аспекты», Донецк 2020 г.; XIV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ-2020», Владимир-Суздаль 2020 г.; XIII Международной научно-практической конференции «Региональная экономика: опыт и проблемы», Владимир 2020 г.; XIII Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ-2018», Владимир 2018 г.; XI Международной научно-практической конференции «Региональная экономика: опыт и проблемы», Владимир 2018 г. XII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017», Владимир 2017 г.

Основные положения и результаты диссертации использованы в учебном процессе на кафедре информационных технологий Владимирского филиала РАНХиГС. Практические положения диссертации прошли апробацию, внедрены и рекомендованы к использованию в: ООО «ВладВнешСервис», при разработке мероприятий по проведению комплексного анализа внешнеторговых рынков России на основе таможенной статистики; в ООО «Айди-маркетинг» при проведении мониторинга профильных и сырьевых рынков, потребляющих отраслей, выявлении и описании основных тенденций и направлений изменчивости рынков; в управлении внешнеэкономической деятельности департамента экономического развития Администрации Владимирской области при разработке прогноза социально-экономического развития Владимирской области на краткосрочный и средне-срочный пе-

риод; в некоммерческой организации Торгово-промышленная палата Владимирской области при моделировании пропорций изменения промышленной и торговой инфраструктуры региона с учетом изменчивости мировых хозяйственных связей, что подтверждается соответствующими актами и справками.

Положения и результаты исследований, выполненных в диссертации, получены при выполнении работы в рамках грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 18-07-00170 «Создание прогностических моделей эволюции природных, живых и социально-экономических систем на основе конечных групп нарушенной симметрии» (2018-2020 гг.), № 14-02-97504 «Моделирование и проектирование нанокластеров и радиоустройств на их основе» (2014-2016 гг.). Положения работы поддержаны в научно-исследовательских работах, выполняемых по заказу ФГБОУ ВО Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации на тему: «Оценка экономических эффектов цифровой трансформации в социально-экономических системах» в 2021г, «Разработка системы предиктивной аналитики показателей внешнеэкономической деятельности региона на основе эффекта нарушения симметрии» на 2022 г.

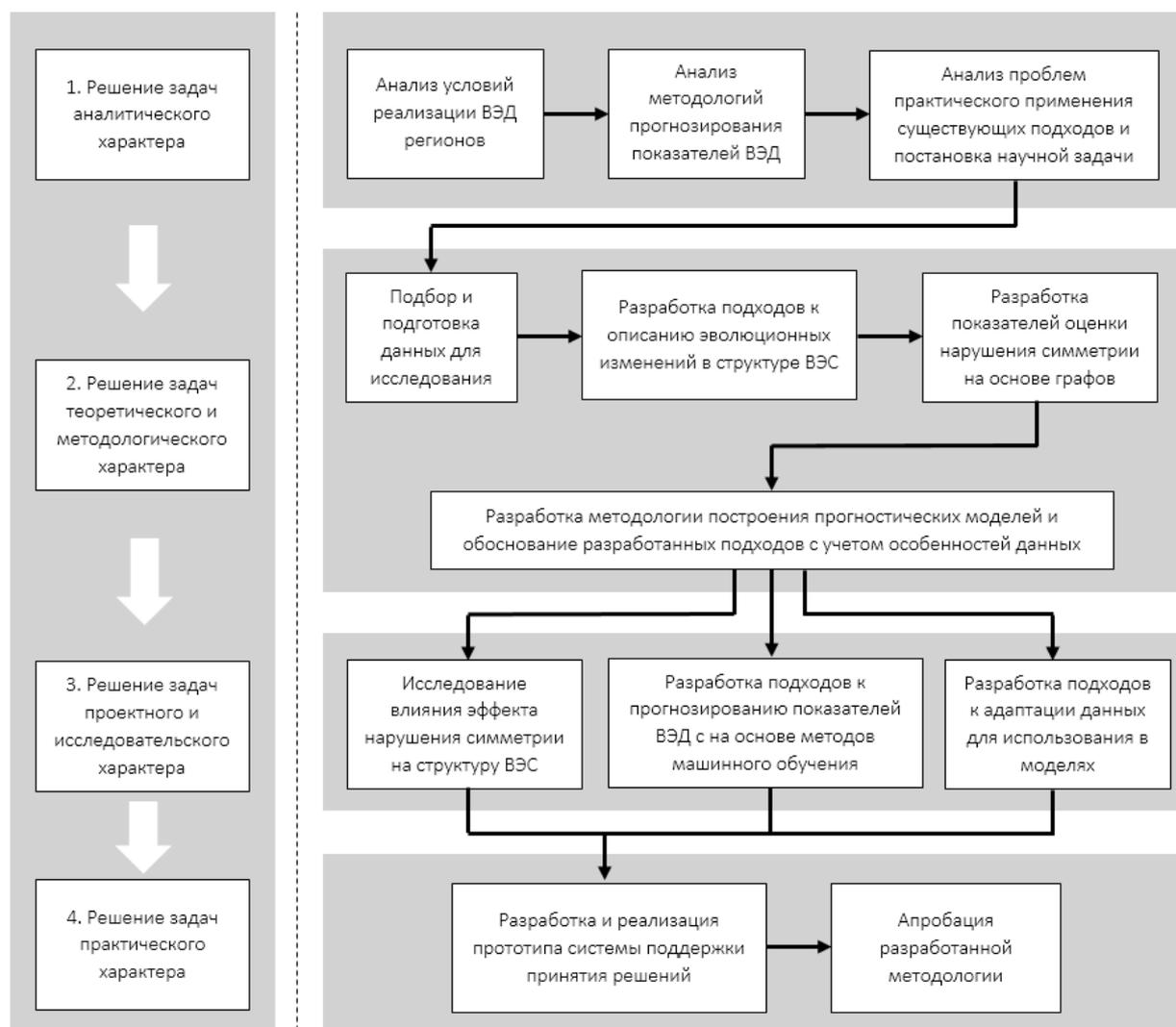


Рисунок 1 – Логическая схема взаимосвязи математических, инструментальных методов и результатов диссертационной работы

Публикации. По теме диссертации опубликовано 47 научных работ общим объемом 64,61 п.л. (авторский вклад – 46,28 п.л.), из них 1 монография 15 п.л. (авторский вклад – 2,14 п.л.), 4 статьи общим объемом 4,12 п.л. (авторский вклад – 2,47 п.л.) в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и WoS, 23 статьи общим объемом 24,45 п.л. (авторский вклад – 20,6 п.л.) в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России., получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и содержание работы. Диссертация изложена на 377 страницах и состоит из введения, пяти глав, с выводами по каждой из них, общих выводов по диссертационной работе в заключении, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 315 наименований и четырех приложений, содержит 18 таблиц и 150 рисунков. Рисунок 1 показывает логическую структуру диссертации, сформированную в соответствии с системным подходом и отражающую последовательность решения исследовательских задач.

Во введении отражена актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также сведения о реализации и публикациях полученных результатов, определена структура работы и логическая связь математических и инструментальных методов диссертационного исследования.

В Главе 1. «Анализ современного состояния и тенденций развития методов планирования и прогнозирования внешнеэкономической деятельности регионов», выполнен анализ методологий описания внешнеэкономической деятельности регионов, выявлены проблемы и ограничения существующего научно-методического обеспечения построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности, рассмотрены инструменты экономико-математического моделирования и описания региональных внешнеторговых связей с учетом отечественного и зарубежного опыта, сформулирована гипотеза диссертационного исследования, содержательно и математически поставлена научная задача исследования. Также в данной главе вводятся основные понятия, используемые в процессе построения прогностических моделей, дается представление о границах используемых математических и инструментальных методов, что позволяет возможность глубоко осмыслить проблемы реализации прогноза и выполнить поиск наиболее эффективных направлений описания внешнеэкономических связей. Выявлены преимущества и недостатки существующих методов прогнозирования показателей внешнеэкономической деятельности, даны рекомендации по совершенствованию методологий прогнозирования на базе лучших отечественных и мировых практик.

В Главе 2. «Исследование подходов и экономико-математического инструментария описания эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов» раскрыты основные проблемы моделирования процессов описания внешнеэкономической деятельности регионов с позиции системного подхода. Рассмотрены возможности применения графовых алгоритмов для описания эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов. Сформулированы проблемы построения прогностических моделей с позиции эволюционного подхода. Раскрыта связь эволюционных процессов и задач прогнозирования

показателей внешнеэкономической деятельности с механизмом наследования признаков поведения отдельных составляющих частей системы и создания устойчивых структур. Приведен основной математический инструментарий, позволяющий описать нарушение симметрии в группах объектов, статистических и графовых моделях, описывающих структуру внешнеторговых связей региона. В соответствии с поставленной научной задачей предложены и разработаны основные показатели, позволяющие выявить, а также качественно и количественно описать процесс нарушения симметрии внешнеэкономических связей региона в разрезе стран-импортеров/экспортеров и товарных групп.

В Главе 3. «Разработка методов построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона на основе эффекта нарушения симметрии» раскрыта сущность эффекта нарушения симметрии в описании эволюционных процессов и задачах построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности. Представлены результаты, связанные с совершенствованием механизмов построения прогностических моделей на основе эффекта нарушения симметрии и дано обоснование разработанных методов. Разработана методология использования моделей, описывающих внешнеэкономические связи региона в текущий момент времени, оценки устойчивости этих связей, а также тенденций к изменчивости, что является базой для создания динамического торгового профиля региона.

В Главе 4. «Разработка инструментальных методов модификации данных и выбора алгоритмов машинного обучения для построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности регионов» обоснована необходимость разработки методики адаптации набора данных, а также конструирования прогностических моделей на основе методов машинного обучения. Показана необходимость преобразования данных на основе имеющейся выборки и генерации новой выборки – признаковой аугментации для получения более качественных результатов прогноза. Разработан метод признаковой аугментации данных на основе методов глубокого обучения и кластерного анализа. Выполнен обзор и обоснование выбора методов машинного обучения, направленных на создание качественных и интерпретируемых прогностических моделей. Показано преимущество методов автоматизированного машинного обучения для формирования ансамбля моделей, позволяющих выполнить прогнозирование. На основе разработанной методологии на реальных данных выполнены численные эксперименты по моделированию и исследованию влияния эффекта нарушения симметрии на изменение структуры внешнеэкономических связей регионов, тестирование моделей и оценка сходимости полученных результатов с реальными значениями показателей.

В Главе 5. «Практическая реализация прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности на основе эффекта нарушения симметрии» на базе разработанных методик реализованы практические инструменты построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона на основе графовых моделей и методов глубокого обучения с возможностью адаптации набора данных для использования в моделях. Выполнена программная реализация и апробация прототипа системы поддержки принятия решений для построения прогностических моделей и проведения вычислительных экспериментов

по построению прогноза показателей внешнеэкономической деятельности регионов, реализующего разработанные подходы и методики. Дана оценка экономической эффективности разработанной методологии.

В заключении представлены основные результаты и общие выводы по диссертационной работе, определены пути их эффективной реализации и направления дальнейших исследований по проблематике диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработаны и обоснованы новые подходы к описанию эволюционных изменений в структуре региональных внешнеэкономических связей, отличающиеся от существующих методов макроэкономического моделирования с использованием графовых моделей и оценкой локальной и глобальной связности сетевых структур. Исходя из анализа актуальных подходов к построению прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона, установлено, что наибольшую сложность при реализации прогностических моделей имеют задачи описания соотношений и скрытых взаимосвязей между объектами экономической системы, а также внешней средой. В работе предлагается использование графовых методов для более детального изучения региональных внешнеэкономических связей. Представлены новые подходы к исследованию внешнеэкономических связей и разработке на их основе торгового профиля региона, позволяющие выявлять устойчивые группы товаров и/или стран и дать оценку тенденций изменения и потенциала развития ВЭД региона.

С позиции системного подхода в реальных крупномасштабных сетях существует обратная связь между топологией взаимодействия объектов и динамикой процессов, происходящей в них. Структура сети может изменяться под воздействием внешних факторов, на которые оказывает влияние топология сети, что порождает эволюционные процессы и перестройку внутрисистемных связей.

В основу исследования лежит утверждение о формировании реальных сетевых сообществ под воздействием скрытого самоорганизующегося принципа, связанного с механизмом эволюции сетевых структур. Данный принцип подразумевает, что любая сложная сетевая структура, характеризуется **некоторой степенью порядка и симметрии**, поэтому важно рассмотреть какие виды симметрии применимы к структуре сети внешнеэкономических связей региона, а также упростить понимание механизмов изменчивости сетевых структур.

Для адаптации существующих подходов к созданию более качественных прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности необходимо обратиться к исследованию **закономерностей изменчивости и упорядоченности связей** между объектами системы и **использованию агрегированных показателей**, отражающих внутренние возможности и внешние условия ведения внешнеэкономической деятельности на региональном уровне.

Одной из теорий о том, как динамика роста влияет на структуру сети, является механизм предпочтительного присоединения, предложенный С. Строгацем, описывающий склонность узла сети связываться с теми узлами, которые уже имеют много соединений. Для оценки локальной изменчивости связей предлага-

ется использовать аналитические возможности теории графов, теории групп и теории информации, а именно анализа структуры полных подграфов – клик внутри сетевой структуры, а также анализа групп автоморфизмов внутри графа для исследования возможностей изменчивости структуры внешнеторговых связей региона.

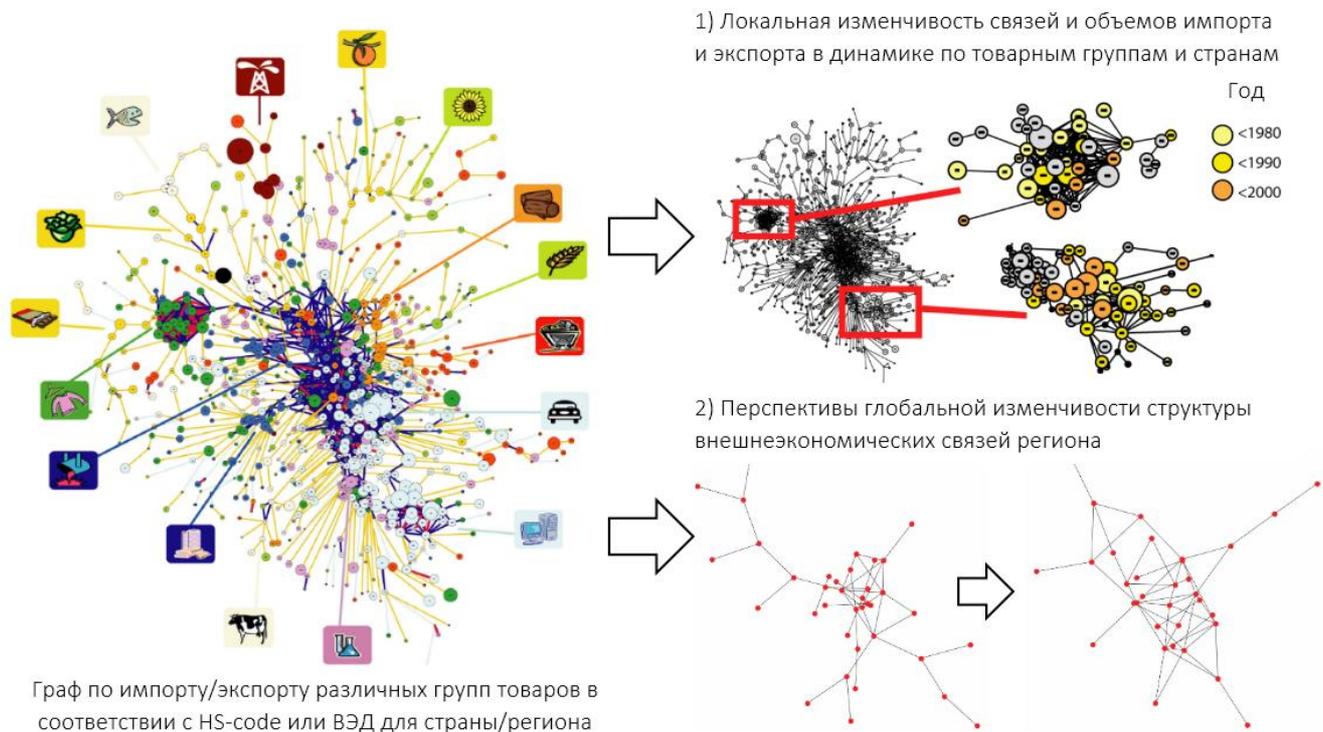


Рисунок 2 – Основные направления развития исследования эволюционных изменений в структуре региональных внешнеэкономических связей

Показано, что практически любая реальная сеть имеет модульную структуру, с вершинами, организованными в сообщества, тесно связанные внутри и слабо связанные друг с другом, и широким распределением степеней вершин k графа, обычно характеризующимся степенной функцией.

Для оценки факторов изменчивости внешнеэкономических связей региона предлагается осуществить переход к использованию агрегированных показателей для оценки уровня экономической сложности территории и производства высокотехнологичных товаров, а именно: индекс выявленных сравнительных преимуществ (RCA); индекс экономической сложности (ECI); индекс продуктовой сложности (PCI). Анализ указанных показателей и построение графовых моделей на их основе позволяет определить степень устойчивости экономики региона, установить перечень продуктов, которые коррелируют с увеличением объема знаний и интеллектуального капитала на отдельной территории.

Научная новизна. Исходя из результатов анализа актуальных подходов к построению прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона сформулирована гипотеза о возможности описания динамики изменчивости структуры региональных внешнеэкономических связей с помощью агрегированных индексов, характеризующих сложность продуктов и взаимодействий региона со странами-импортерами/экспортерами продуктов, а также для

описания эволюционных изменений в структуре региональных внешнеэкономических связей на основе анализа локальной и глобальной изменчивости связей.

2. Разработан новый подход к описанию процесса нарушения симметрии в графовых моделях региональных внешнеэкономических связей, отличающийся оценкой степени нарушения симметрии графа на основе анализа клик в графе. Показана связь явления локальной изменчивости с нарушением симметрии сетевой структуры. На основе исследований Д. Гарлашелли, Ф. Руцценти и Р. Басосидва показаны два основных направления исследований применения суперсимметричной теории стохастической динамики (STS) в анализе графов:

1. Исследование симметрии разворота связей в ориентированных графах.
2. Исследование проблемы стохастического нарушения симметрии в динамически изменяющихся сетях.

Вводится понятие **нарушения симметрии структуры региональных внешнеэкономических связей как процесса снижения коэффициента симметрии графа**, характеризующегося изменением упорядоченности экономических связей региона, снижением динамической устойчивости и сложности этих связей, а также нарушением способности экономической системы региона к эволюционным изменениям в долгосрочной перспективе. Указывается что данный термин связан с числовыми характеристиками графовых моделей представления региональных внешнеэкономических связей, что подтверждается дальнейшими исследованиями. Граф или сетевая структура $G(V, E)$ содержит множество вершин V и множество ребер E . Отображение из множества вершин V в себя называется перестановкой. Пусть множество перестановок на вершины V обозначается как Ω , а символом «*» обозначается двоичная операция, которая определяется как $\forall p, q \in \Omega, v \in V, (p * q)v = p(qv)$. Автоморфизм графа характеризуется оператором перестановки ω с сохранением смежности множества вершин V . Любые вершины v_1 и v_2 являются смежными тогда и только тогда, когда ωv_1 и ωv_2 являются смежными. Множество автоморфизмов графа при операциях перестановки образует группу размером α_G , которая обозначается как $Aut(G)$.

Степень симметрии в сети определяется размером группы автоморфизмов. Сеть называется симметричной, если ее граф имеет нетривиальную группу автоморфизмов и обладает высокой степенью глобальной связности. Степень симметрии сети определяется с помощью размера групп автоморфизмов α_G . Для того, чтобы можно было корректно сопоставить показатели симметрии сетей разных размеров, также используется показатель

$$\gamma_G = (\alpha_G / N_G!)^{1/N_G}, \quad (1)$$

который измеряет симметрию относительно максимально возможной симметрии (полный граф с вершинами N_G и пустой граф, являются наиболее симметричными графами, оба из которых имеют множество автоморфизмов размером $\alpha_G = N_G!$).

На рисунке 3 для автоморфизма вершин (1, 2) просто необходимо отобразить вершины 1, 2 друг в друга, чтобы сохранить смежность между всеми вершинами. Однако для автоморфизмов $\{(1,6), (2,7), (3,8), (4,5)\}$, чтобы сохранить смежность всего набора вершин требуется отобразить друг в друга несколько вершин, что

представляет собой структурную симметрию в глобальном смысле, в то время как первое представляет структурную симметрию в локальном смысле.



Рисунок 3 – Пример симметричного графа G_1 (а) и графа с нарушением глобальной симметрии G_2 (б)

Практически невозможно, чтобы сети реального мира были глобально симметричными, так как у реальных сетей меньше шансов иметь автоморфизмы, которые реализуют перестановки всех вершин или групп вершин. Поскольку сохранение глобальной симметрии сопровождается перестановкой вершин при сохранении смежности, такие симметрии чувствительны к изменениям в сети, т.е. даже относительно небольшие возмущения могут привести к нарушению симметрии структуры сети. Для графов, изображенных на рисунке 3 $|Aut(G_1)| = 72$, $|Aut(G_2)| = 12$. Размер групп автоморфизмов существенно уменьшается с 72 (для графа G_1) до 12 (граф G_2) после удаления вершины «8», так как изменяется набор перестановок для графа G_1 $\{(2, 3), (7, 8), (6, 7), (1, 2), (1, 6), (2, 7), (3, 8), (4, 5)\}$ и для графа G_2 $\{(2, 3), (6, 7), (1, 2)\}$. В этом случае была **нарушена глобальная симметрия графа**, что привело к значительному уменьшению размера группы автоморфизмов.

Показано, что глобальная симметрия в сетях предполагает организацию сетевых структур по строгим правилам, что не наблюдается в большинстве сетей реального мира. Поэтому при анализе крупных сетевых структур, в том числе внешнеэкономических связей страны или региона, **следует обратить внимание на локальную симметрию сети**. Концепция анализа сетей на основе локальной симметрии основана на теории групп перестановок, которая определяется следующим образом: сеть G локально симметрична, если $Aut(G)$ может быть разложена на большое количество составляющих:

$$Aut(G) = H_1 \times H_2 \times \dots \times H_n, \quad (2)$$

где $H_1 \dots H_n$ – геометрические мотивы, формирующие локальные участки в сети.

« \times » – оператор объединения.

Группа автоморфизмов дает возможность создавать симметричные прототипы – подграфы, используя ее геометрические мотивы для изучения локальных механизмов, объясняющих возникновение и нарушение симметрии в сети. Подграф, сформированный на основе геометрического мотива H называется симметричным мотивом, а подграф на множестве вершин $V_0 \in V(G)$ – это граф, полученный путем взятия V_0 и любых ребер, конечные точки которых находятся в V_0 . **Сетевыми мо-**

тивами называются подграфы, обладающие устойчивой структурой и повторяющиеся в отдельно взятой сети, а также в нескольких сетях. Такие симметричные сетевые мотивы могут иметь разнообразную топологию: «кольцо», «звезда», «дерево», полносвязная топология и др.

С учетом групп автоморфизмов, действующую на множество вершин V , можно установить эквивалентное отношение множества вершин, которое определяется таким образом, что вершина x эквивалентна вершине y тогда и только тогда, когда существует автоморфизм $g \in \text{Aut}(G)$, $gx = y$. В соответствии с этим эквивалентным соотношением можно построить соответствующее разбиение на множестве вершин $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$. Каждый вариант разбиения называется **орбитой**. Следовательно, множество вершин V разбивается на классы, состоящие из эквивалентных элементов. Это означает что все элементы, входящие в один класс, могут быть отображены подстановками друг в друга, при этом элементы из разных классов не могут отображаться друг в друга, что помогает решать два вида задач: оценить эквивалентное отношение между вершинами; упростить структуру сети.

Всемирная торговая сеть представляет собой граф $G(V, E)$, с множеством вершин V , представляющий страны, и ребрами E , представляющий торговые отношения между этими странами. Масштаб, сети может быть различный: регион, штат, провинция и т.п. Количество вершин и ребер в этом графе обозначается N_G и M_G соответственно. Торговые отношения между странами и регионами определяются как ребра, обычно выраженные в объемах товарооборота в денежном выражении.

В случае проекции на отдельную страну или регион, для определения смежности используется коэффициент корреляции между динамикой изменчивости объемов импорта/экспорта всех или отдельного вида продукции из страны или региона в остальные страны, что также характеризует торговые отношения между регионом или страной и всемирной торговой сетью. В работе показано, что основная проблема для оценки степени симметрии графа по показателю γ_G состоит **в значительном количестве вершин**: при большом количестве товаров и потребителей, **возникают сложности при расчете количества групп автоморфизмов**. При большом количестве вершин V и ребер E анализ графа $G(V, E)$ усложняется и его геометрическое представление.

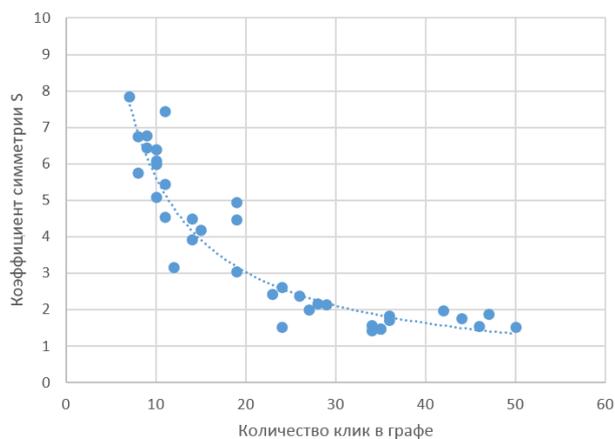
Для выявления групп вершин, связанных друг с другом, следует перейти к задаче выделения полных подграфов – клик. Выявление и анализ временных рядов товарных групп, описывающих внешнеэкономическую деятельность региона в виде количества вершин максимальной клики графа, т.е. кликового числа $q(G)$ графа, позволяет выявить основные устойчивые во времени товарные группы.

В работе высказывается и подтверждается гипотеза о том, что чем больше кликовое число графа, тем больше степень локальной связанности графа, что позволяет сделать предположение о связи явления нарушения симметрии с изменением кликового числа и изменением общего количества клик N_q в графе. В отличие от мотивов клики являются неповторяющимися структурами, однако, как и в мотивах в кликах могут присутствовать «центры симметрии» – узлы имеющие высокую степень вершин. Корреляционная матрица (рисунок 4) основных показателей, описывающих структурные особенности графа, которая была построена на основе

аналогичных графов для множества регионов Российской Федерации, позволяет отметить значение модуля коэффициента корреляции на уровне 0,91, что говорит о высокой степени взаимосвязи показателя γ_G и количества клик N_q в графе. Чем выше количество клик в графе, тем меньше показатель симметрии, т.е. $\gamma_G \sim 1/N_q$.



а



б

Рисунок 4 – Корреляционная матрица по структурным характеристикам графа (а) и зависимость кликового коэффициента локальной симметрии S_G от количества клик в графах с различным количеством узлов и ребер

Полученные результаты позволили сделать **важный вывод: для оценки степени симметрии графа можно использовать не только размер группы автоморфизмов, но и количество клик в графе, что значительно снижает вычислительную нагрузку при анализе.** Чем больше вершин и связей в графе, тем больше количество клик в нем, поэтому для объективной оценки степени симметрии графа по количеству клик в нем следует соотнести это значение с общим размером графа. Эмпирическое соотношение выглядит следующим образом:

$$S_G = n/N_q, \tag{3}$$

где $n = N_G + M_G$ – размер сети, зависящий от количества узлов и ребер.

Данный показатель определяется в работе как **кликковый коэффициент локальной симметрии** структуры региональных внешнеэкономических связей. Используется в качестве критерия оптимизации при формировании структуры графа и имеет сходство с коэффициентом кластеризации графа, поэтому для анализа и интерпретации значения коэффициента локальной симметрии при формировании графа существует возможность оценить при каком количестве клик графа сохраняется высокая степень локальной связанности графа.

Научная новизна. Вводится понятие нарушения симметрии структуры региональных внешнеэкономических связей, характеризующего динамическую устойчивость связей экономических связей региона. Дано обоснование использования кликового числа для расчета коэффициента локальной симметрии графа, сущность которого заключается в оценке устойчивости и эволюционного потенциала конкретной конфигурации сетевой структуры. Предложенный коэффициент симметрии является измеряемой величиной, характеризующей степень локального

нарушения симметрии структуры региональных внешнеэкономических связей. Полученные результаты имеют важное прикладное значение – снижение вычислительной сложности при оценке симметрии графа на практике, связности и устойчивости сетевой структуры. Показана возможность оптимизации структуры графа с учетом сохранения высокой степени локальной связности.

3. Разработан инструментальный метод построения графа, описывающего структуру внешнеэкономических связей, отличающийся использованием алгоритма Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) для понижения размерности и включения связей между вершинами в граф на основе обобщения признаков объектов. В работе показано, что для оценки устойчивости связей в динамике недостаточно описания структурных особенностей графа на основе расчета показателя локальной симметрии графа и выделения фактора графа. Для этого необходимо сформулировать адекватные правила, по которым формируется структура связей графа в зависимости от измеряемых признаков вершин. Показана возможность использования алгоритма Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) для описания динамики взаимодействий между вершинами неориентированного графа, предложенного в 2018 г. Л. Макиннесом. Алгоритм UMAP позволяет выполнить равномерную аппроксимацию многообразия вариантов отображения точек (объектов) в многомерном пространстве признаков с поправкой на расстояние до ближайшего соседа каждой точки.

Для UMAP множество из ребер графа представляет собой нечеткое множество с функцией принадлежности, определяемой вероятностью существования ребра между двумя вершинами. UMAP использует экспоненциальное распределение вероятностей соединения вершин графа с возможностью использования метрик расстояний Гауэра, Манхеттена и т.д. Для точек в многомерном пространстве отображенных в системе координат двух главных компонент (c_1 ; c_2) (рисунок 5) если одна из точек x_j при отображении в пространстве признаков оказывается достаточно далеко от остальных, то вычисляется расстояние до ее ближайшего соседа x_i $d(x_i, x_j)$ и это расстояние вычитается из расстояний до остальных точек, что позволяет представить множество более компактно и выполнить кластеризацию точек. При этом решается и задача нормировки распределений вероятностей расстояний до ближайших соседей для каждой точки.

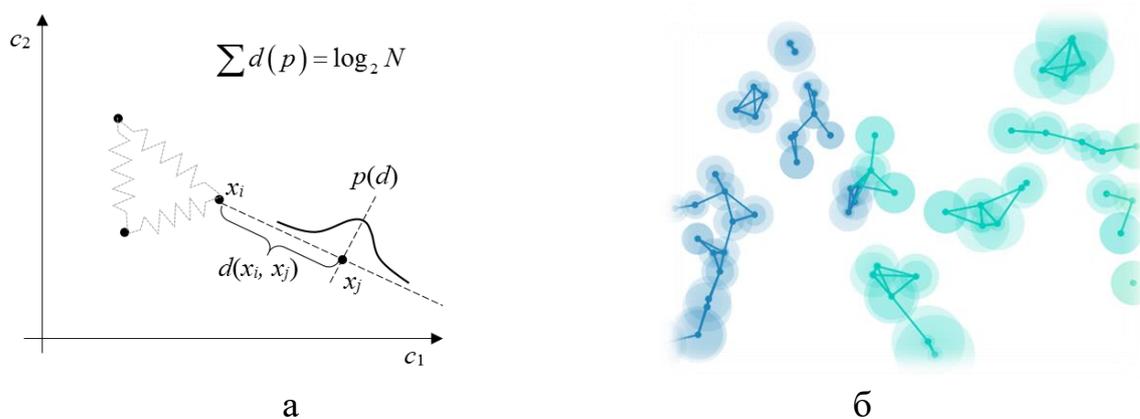


Рисунок 5 – Нормировка расстояний между точками UMAP (а) и логика построения графа UMAP (б)

Для UMAP это условие нормировки связано с энтропией, где сумма вероятностей для всех точек N составляющих множество нормируется на энтропию по количеству ближайших соседей каждой точки. Таким образом, распределения вероятностей для формирования весов связей имеет следующий вид:

$$p_{ij} = e^{-\frac{d(x_i, x_j) - \rho_i}{\sigma_i}}, \quad (4)$$

где ρ является параметром, описывающим расстояние от каждой i -й точки данных до ее первого ближайшего соседа,

Это дает возможность варьировать метрическое расстояние для каждой точки данных. Отсутствие нормализации, а, следовательно, и знаменателя в уравнении (5), сокращает время построения многомерного графа. UMAP определяет количество ближайших соседей k следующим образом:

$$k = 2^{\sum_i p_{ij}} \quad (5)$$

Для достижения нормировки весов связей использует следующий подход:

$$p_{ij} = p_{i|j} + p_{j|i} - p_{i|j} \cdot p_{j|i} \quad (6)$$

Нормировка или **симметризация весов** связей необходима, на этапе группировки точек (с помощью параметра ρ) когда вес ребра графа между узлами А и В может быть не равен весу ребра между узлами В и А.

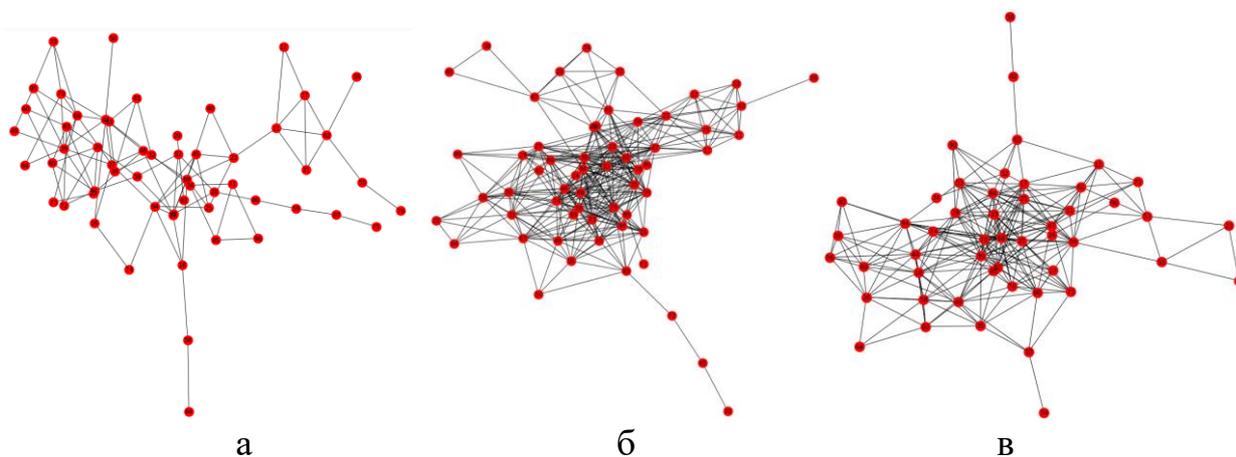


Рисунок 6 – Граф экспорта товаров Владимирской области за 2021 год, построенный на основе коэффициента корреляции (а) и на основе алгоритма UMAP с расчетом расстояний по косинусу для трех (б) и четырех (в) главных компонент

На рисунке 6 изображены различные варианты построения графов, реализующих различные механизмы учета сходства объектов (групп товаров). Графы на основе UMAP позволяют учесть сходство двух товарных групп на основе комплекса признаков, представленных в форме числовых и категориальных данных.

Показано, что веса связей, рассчитанные на основе косинусного расстояния для отдельных точек, представляющих собой временные ряды для товаров (стран) необходимы для формирования структуры графа. На рисунке 7 показаны варианты построения проекций продуктов в пространстве главных компонент.

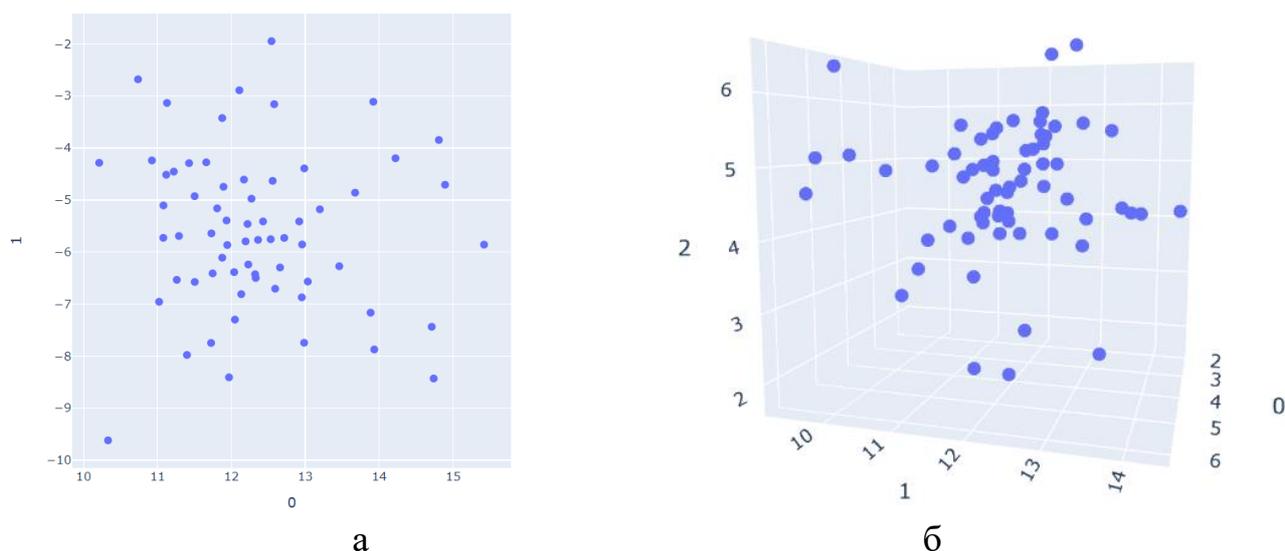


Рисунок 7 – Проекция продуктов в пространстве двух (а) и трех (б) главных компонент для экспорта Владимирской области за 2021 год с оптимизацией относительной локальной плотности данных на основе расстояний по косинусу (по осям показаны порядковые номера проекций 0,1,2)

Научная новизна. Метод отличается использованием перекрестной энтропии в качестве для нормирования расстояний между вершинами графа. УМАР сохраняет как локальную, так и глобальную структуру связей между точками графа, в то же время значение перекрестной энтропии позволяет дать общее понимание на сколько далеко друг от друга расположены точки, а также в дальнейшем оценить степень симметрии графа. При дальнейшем анализе результатов построения графов в этом случае оказывается более важной не симметрия связей между точками данных при его построении, а симметрия связей между центроидами кластеров.

4. Разработана и верифицирована методология использования нового подхода формирования графа региональных внешнеэкономических связей и оценки локальной симметрии графа для построения прогностических моделей показателей ВЭД, отличающаяся оценкой устойчивости связей в динамике с учетом внутренних особенностей и внешних условий ведения внешнеэкономической деятельности на региональном уровне. В соответствии с поставленной научной задачей, предложен и обоснован научно-методологический подход к ее решению, суть которого состоит в использовании комплекса экономико-математических, статистических и инструментальных методов для построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности. Описанные подходы могут быть комплексированы в единую методологию, позволяющую реализовать прогнозирование по двум отличающимся направлениям:

1. Построение рекомендаций по развитию и оценке перспективных направлений внешнеэкономической деятельности на региональном уровне, выраженный в освоении новых направлений импорта и/или экспорта по отдельным товарам или группам товаров в соответствии с номенклатурой, а также развитие сотрудничества со странами-импортерами/экспортерами этих товаров.

2. Реализация прогноза количественных показателей внешнеэкономической деятельности регионов России, в том числе по выявленным перспективным направлениям, а именно: по изменению объемов импорта/экспорта, динамики агрегированных показателей в разрезе стран и/или групп товаров.

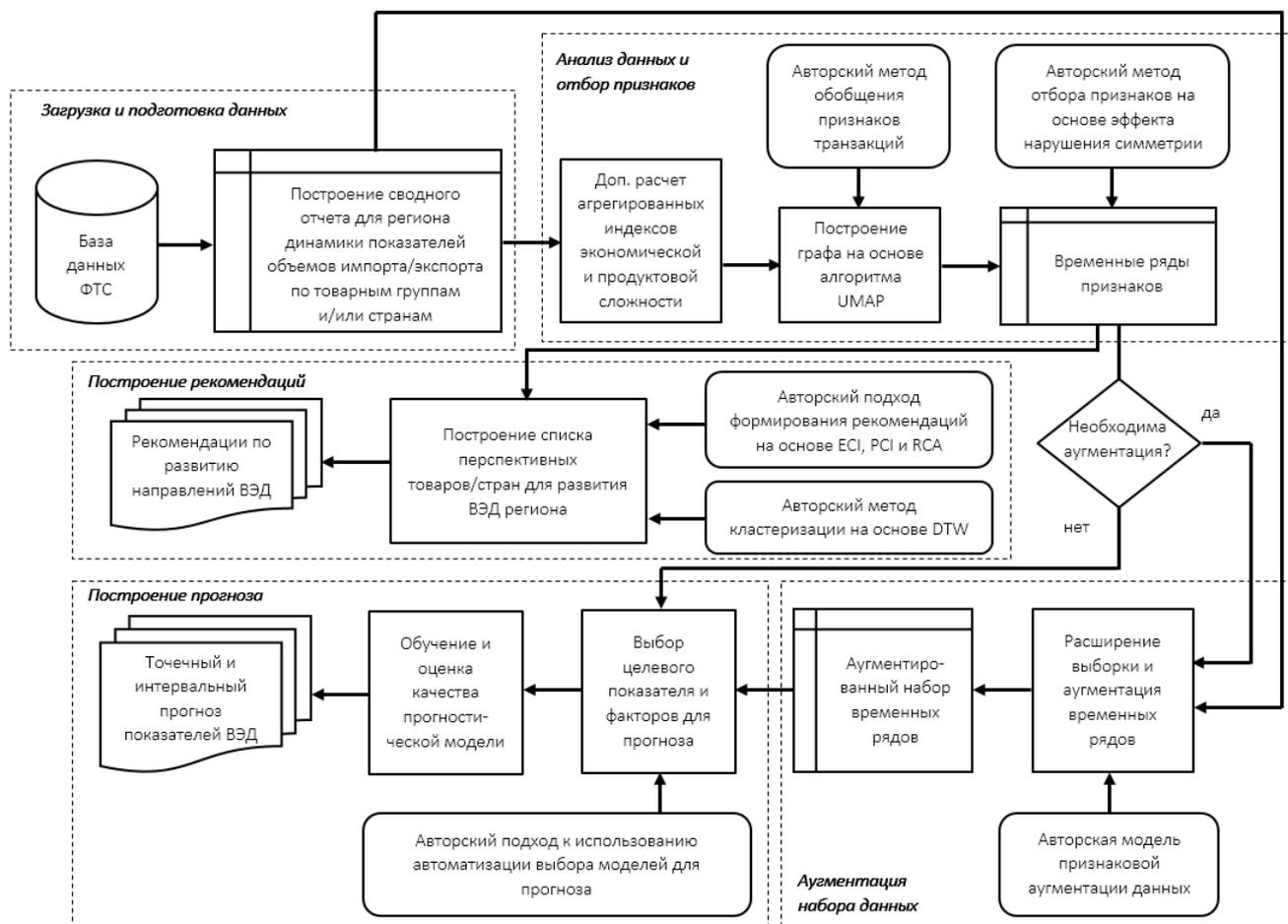


Рисунок 8 – Структурная схема научно-методологического подхода и прототипа системы поддержки принятия решений по построению прогностических моделей показателей ВЭД региона

Для реализации указанных направлений прогноза предлагается использование следующих методов и моделей:

- методики предварительного анализа данных, включающей в себя метод построения графа на основе комплекса показателей ВЭД с использованием алгоритма UMAP, а также метода отбора признаков на основе эффекта нарушения симметрии;
- метода отбора признаков, для оптимизации глобальной структуры графа;
- методики признаковой аугментации данных, позволяющей реализовать работу с короткими нестационарными временными рядами, более полно исследовать имеющихся взаимосвязи между факторами в исходном наборе данных и повысить качество прогностической модели;
- метода прогноза показателей внешнеэкономической деятельности, отличающегося использованием методов автоматизированного машинного обучения для выбора моделей на основе ансамблевых методов;

– метода построения рекомендаций по развитию направлений внешнеэкономической деятельности на основе расчета индекса выявленных сравнительных преимуществ (RCA), индекса экономической сложности (ECI) и индекса продуктовой сложности (PCI) и кластеризации временных рядов.

Ключевой особенностью разработанной методологии является оценка локальной симметрии графа для формирования связей между вершинами графа. Любая сетевая структура кодирует в себе информацию о связях объектов системы. Однако для реализации отбора признаков необходимо качественно и количественно оценить изменение структуры связей в графе при изменении масштаба графа путем включения и исключения новых ребер и вершин.

В работе показана возможность использования теории информации для определения информационной емкости графа, а также оценки снижения информационной избыточности. Дано обоснование использования показателя информационной энтропии Шеннона для оценки удельной информативности графа. Для количественной оценки того на сколько представленный граф отличается от графа с максимальной энтропией ($H \leq H_{\max}$) служит коэффициент сжатия:

$$\lambda = H/H_{\max} = n_{\min}/n \quad (7)$$

Если рассматриваемый граф и графа с максимальной энтропией содержат одинаковое количество информации I_0 с, то количество элементов n рассматриваемого графа всегда больше количества элементов n_{\min} соответствующего ему графа с максимальной энтропией. Для оценки доли элементов – вершин и ребер графа, которые являются избыточными для описания характеристик системы используется коэффициент избыточности

$$\beta = 1 - \lambda = (n - n_{\min})/n \quad (8)$$

Необходимо стремиться к тому чтобы конфигурация графа была максимально информативна при минимуме элементов, т.е. обладать высокой степенью упорядоченности. Теория фракталов дает возможность описать состояние системы с точки зрения структурной упорядоченности. Аналогично фракталам сетевые структуры также облают свойствами самоподобия и саморепликации. Характеристикой упорядоченности состояний сети является фрактальная размерность D .

В работе показано, что фрактальная размерность позволяет оценить сложность сетевых структур на основе многомерной матрицы смежности для построения ориентированных графов разного масштаба. Чем больше фрактальная размерность, тем больше возможности эволюции системы и тем выше способность системы к устойчивой саморепликации.

Представленные в работе показатели позволили сформировать новый подход для отбора признаков на основе анализа изменчивости сетевых структур с учетом неопределенности состояний системы:

1. Коэффициент сжатия характеризует избыточность информации, закодированной в структуре графа отдельных групп элементов системы (кластеров).
2. Показатель фрактальной размерности описывает возможности саморепликации информационной и функциональной структуры системы.

3. Граф с высокой степенью избыточности информации и высокой степенью упорядоченности вершин должен формироваться с учетом уменьшения избыточности $\beta \rightarrow \min$ при ограничении фрактальной размерности сетевой структуры $D \geq 1$ для сохранения устойчивой структуры связей между точками графа и коэффициента локальной симметрии S_G для оценки уровня локальной связанности не ниже оптимального значения $S_G \geq S_{G_{opt}}$. Данный подход используется для определения структуры и параметров графа, отбора вершин и установления связей.

Научная новизна. Обоснован научно-методологический подход к построению прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности региона, сущность и отличие которого заключается в объединении ряда методов в целях повышения гибкости и обоснованности принятия решений по развитию основных направлений ведения внешнеэкономической деятельности региона, подкрепленный прогнозными значениями целевых показателей по выбранному направлению. Энтропийно-фрактальный анализ позволяет выявлять феноменологические соотношения, позволяющие спрогнозировать возможное будущее поведение системы. Разработанная методология позволяет реализовать преимущества современных инструментальных методов на основе анализа графов при решении задач прогнозирования и планирования внешнеэкономической деятельности.

5. Разработан метод отбора признаков, отличающийся использованием кликового коэффициента симметрии и коэффициент Джини для оптимизации глобальной структуры графа UMAP с позиции максимума информации для связанных признаков. Показана необходимость отбора признаков международных транзакций и изучения структуры региональных внешнеэкономических связей в целях устранения высокой степени линейной зависимости между переменными модели – мультиколлинеарности. Предлагаемый в работе подход к отбору признаков пошагово описывается следующим образом:

1. Для исходного набора данных формируется карта признаков на основе меры схожести по косинусным расстояниям и визуализируется оптимизированный полносвязный граф UMAP с учетом симметризации весов.

2. Выполняется бинарная классификация связей и отображение на графе только связей между объектами, не являющиеся коллинеарными на основе косинусной меры сходства.

3. Для оптимизации структуры графа, т.е. включения/исключения связей между объектами используется кликовый коэффициент симметрии и коэффициент Джини, позволяющий сбалансировать глобальную структуру графа с позиции максимума информации для связанных признаков.

4. На основе полученной структуры графа вычисляются максимальные клики и выбирается признаков, входящих в одну или несколько максимальных клик, имеющих максимум взаимной информации MI для описания предметной области.

На рисунке 9 показана проекция ориентированного графа в пространстве двух главных компонент на основе косинусных расстояний на примере структуры экспорта для Владимирской области за 2021 г. В показанном случае граф $n_neighbors = 15$, $min_dist = 0.1$. отображает глобальную структуру связей графа.

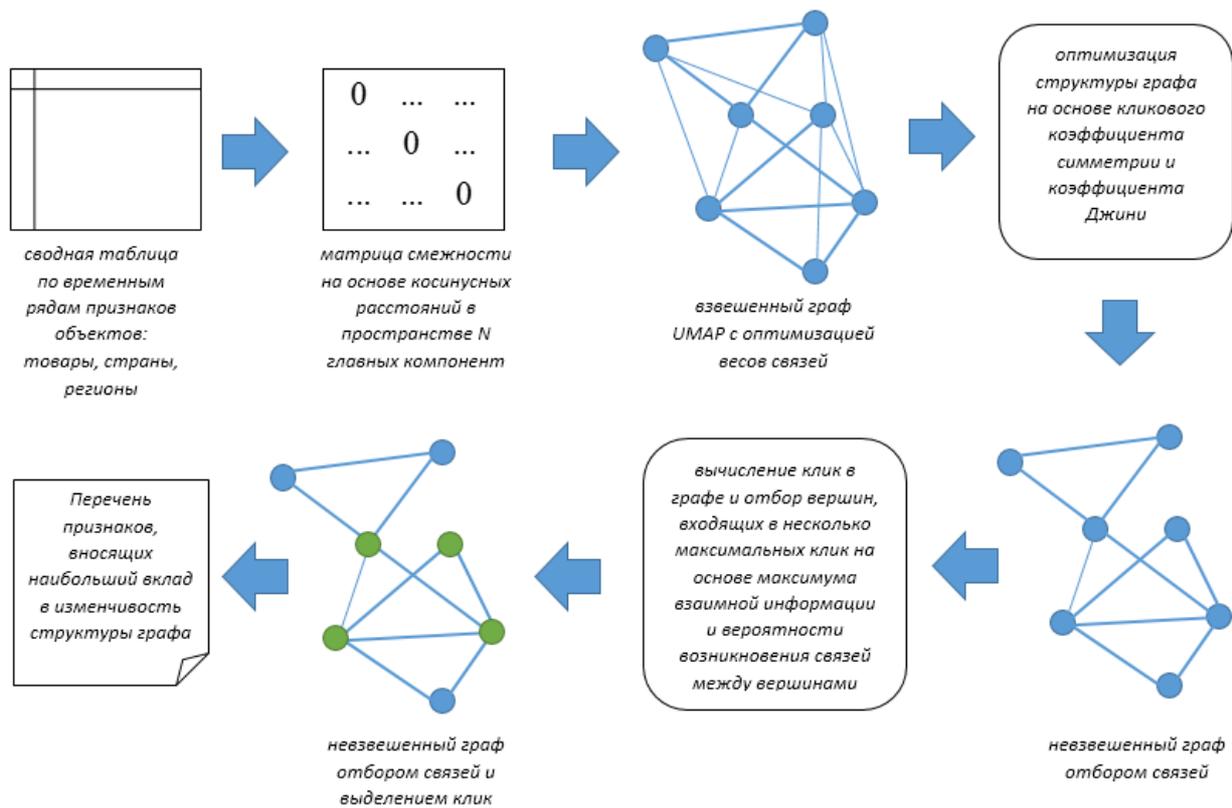


Рисунок 9 – Методика отбора признаков на основе графов

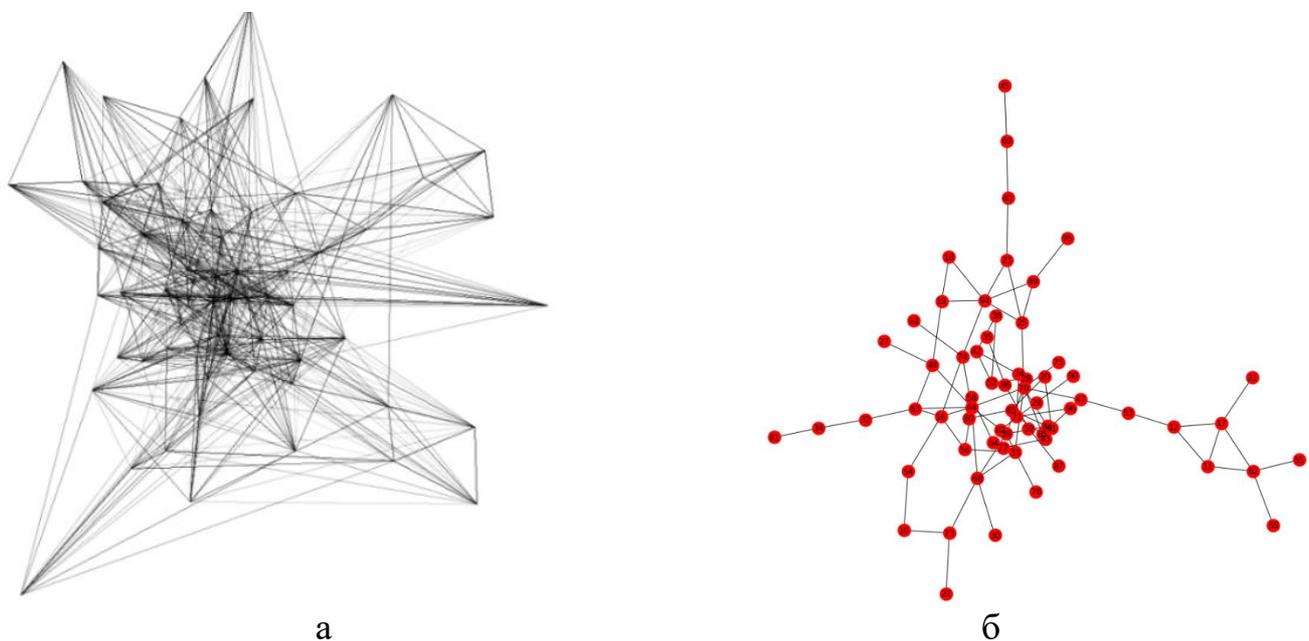


Рисунок 10 – Проекция продуктов в пространстве двух главных компонент, построенных на основе UMAP для экспорта Владимирской области за 2021 год с оптимизацией относительной локальной плотности данных на основе косинусных расстояний (а) и с дополнительным отбором связей (б)

Показанные результаты формируют неориентированный граф, а для включения/исключения связей в граф необходимо выполнить оптимизацию порогового значения весов связей между вершинами графа и оставить только наиболее значимые связи с точки зрения решаемой задачи. При этом критерием оптимизации является максимум кликового коэффициента симметрии при значении коэффициента Джини графа, не менее заданного ($GI \geq 0,2$). Сформированный граф имеет максимальное значение $S_G = 2,76$ при значении индекса Джини графа $GI = 0,22$. Первые пять максимальных клик полученного графа имеют вид: ([44, 48, 63], [44, 70, 39], [44, 39, 68], [44, 16, 56], [44, 16, 74]). Это означает, что товарные группы в соответствии с номенклатурой ТНВЭД с номерами [44, 48, 63, 70, 39, 68, 16, 56, 74] составляют основной набор предикторов для построения модели.

Полученные признаки не имеют сильной парной корреляции ($>0,9$ по шкале Чеддока) (рисунок 11), хотя между некоторыми из них прослеживается корреляционная зависимость на достаточно высоком уровне, необходимо, чтобы указанный набор показателей имел максимум взаимной информации MI при минимуме признаков, что максимально уменьшит искажения при описании структуры региональных внешнеэкономических связей используемых для описания факторов изменчивости при построении прогностических моделей показателей ВЭД региона.

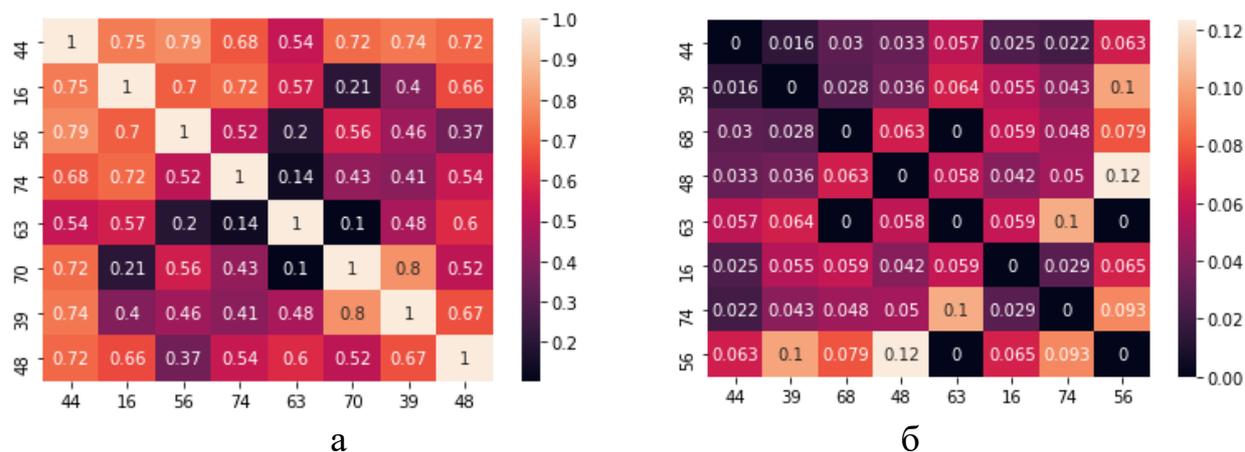


Рисунок 11 – Тепловые карты парных коэффициентов корреляции (а) и косинусных мер сходства (б) отобранных признаков

Для анализа процессов роста и эволюции, а также оценки направлений и факторов изменчивости сетевых структур важной задачей является прогнозирование возникновения связей между вершинами графа, описывающего предметную область. Чем больше вероятность возникновения связи между двумя вершинами графа, тем меньше неопределенность события, изменяемая на основе количества информации, которую вносит объект в систему. Для графа G необходимо оценить вероятность возникновения связи между парой ребер (x, y) . Такая вероятность S_{xy} оценивается с помощью отрицательной условной информации о связи между парой вершин (x, y) графа с учетом количества общих соседей O_{xy} . При этом собственная информативность узла характеризуется вероятностью возникновения определенного количества связей с другими узлами $p(x)$ определяется следующим образом:

$$I(x) = \log(1/p(x)) = -\log p(x). \quad (9)$$

Если X и Y – две случайные величины, а x и y их значения, то взаимная информация X и Y измеряет степень уменьшения неопределенности результата x , когда результат y известен, или наоборот, и определяется следующим образом

$$I(x; y) = \log \frac{p(x|y)}{p(x)} = -\log p(x) - (-p(x|y)) = I(x) - I(x|y). \quad (10)$$

Если x, y представляют две вершины графа, а $\Gamma(x), \Gamma(y)$ описывают наборы их соседей, а набор O_{xy} описывает общих соседей, то можно утверждать, что $O_{xy} = \Gamma(x) \cap \Gamma(y)$. Согласно теории информации, если вероятность возникновения связи увеличивается, то уменьшается количество информации о состоянии объекта, и, следовательно, вероятность возникновения связи положительна и пропорциональна отрицательному значению условной информации. Вероятность возникновения связи определяется относительным показателем S_{xy} .

$$S_{xy} \cong -I(L_{xy}^1 | O_{xy}), \quad (11)$$

где $I(L_{xy}^1 | O_{xy})$ – условная информация о существовании ребра между парой вершин (x, y) , имеющих общих соседей O_{xy} ;

L_{xy}^1 характеризует наличие связи между парой вершин.

$$I(L_{xy}^1 | O_{xy}) = I(L_{xy}^1) - I(L_{xy}^1; O_{xy}), \quad (12)$$

где $I(L_{xy}^1)$ – представляет собой информативность при условии что пара вершин (x, y) уже соединены связью;

$I(L_{xy}^1; O_{xy})$ – взаимная информация между парой узлов (x, y) , которая имеет одну связь между ними, и известны общие соседи указанной пары вершин.

$$I(L_{xy}^1; O_{xy}) = \sum_{z \in O_{xy}} I(L_{xy}^1; z) = \sum I(L_{xy}^1; z), \quad (13)$$

где $I(L_{xy}^1; z)$ определяется как средняя взаимная информация по всем парам вершин, подключенных к вершине z .

Вероятность существования связи между парой вершин (x, y) также прямо пропорциональна средней взаимной информации по всем парам вершин и может быть вычислена на основе показателя S_{xy} :

$$S_{xy} \cong \sum_{z \in O_{xy}} I(L_{xy}^1; z) - I(L_{xy}^1) \quad (14)$$

Относительный показатель S_{xy} может иметь как положительное, так и отрицательное значение и его величина характеризует вероятность возникновения связи между парами вершин.

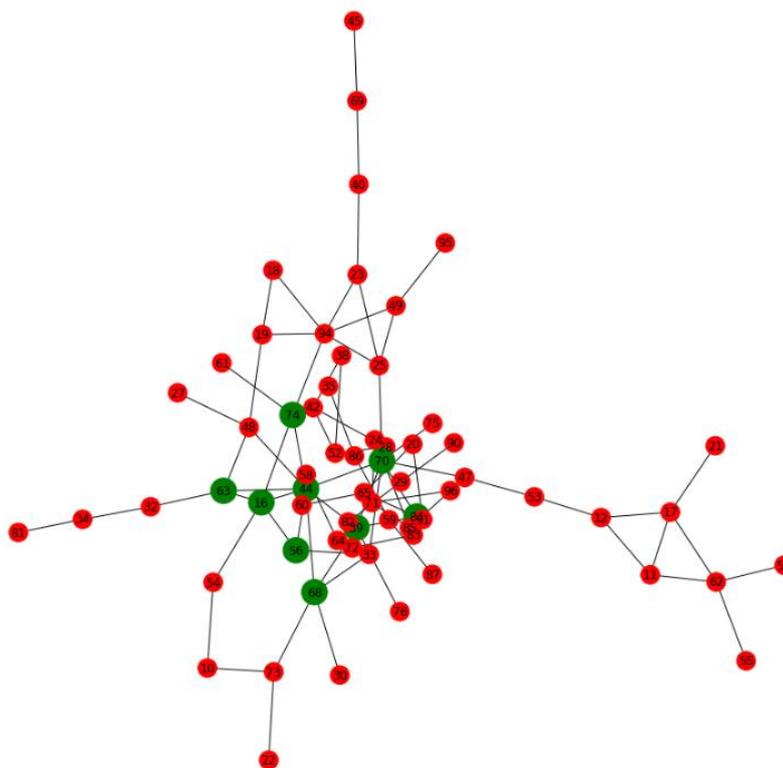
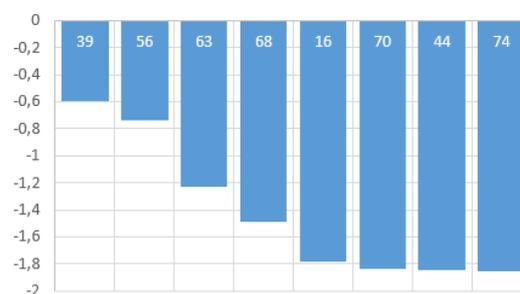


Рисунок 12 – Проекция продуктов в пространстве двух главных компонент, построенных на основе UMAP для экспорта Владимирской области за 2021 год с выделением перечня вершин, входящих в 5 первых клик

На основе взаимной информации был выявлен перечень продуктов, состоящий из 9 вершин, обладающих отсутствием мультиколлинераности, и имеющих максимальный показатель взаимной информации при оптимальной структуре графа. На рисунке 13 показаны результаты вычисления показателя S_{xy} , позволяющего оценить вероятности возникновения связи между парами вершин, входящих в максимальные клики и средние вероятности возникновения новых связей на вершинах, входящих в максимальную клику.

	44	70	39	68	16	63	56	74
44		-1,95	-0,4	-2,61	-2,23	-1,95	-1,54	-2,23
70	-1,95		-1,7	-2,61	-2,23	-1,95	-0,14	-2,23
39	-0,4	-1,74		-1,03	-0,19	-0,22	0,13	-0,68
68	-2,61	-2,61	-1		-2,09	0	0	-2,09
16	-2,23	-2,23	-0,2	-2,09		-2,23	-1,8	-1,71
63	-1,95	-1,95	-0,2	0	-2,23		0	-2,23
56	-1,54	-0,14	0,13	0	-1,8	0		-1,8
74	-2,23	-2,23	-0,7	-2,09	-1,71	-2,23	-1,8	

а



б

Рисунок 13 – Оценка вероятности возникновения связи между парами вершин, входящих в максимальные клики (а) и усредненная оценка вероятности возникновения новых связей на вершинах, входящих в максимальную клику

Следует отметить, что при дополнении перечня вершин из последующих клик, значение S_{xy} не возрастает, а это значит, что они не вносят дополнительной

взаимной информации в описание изменчивости структуры графа. Так, например, для показанного примера перечень вершин для 5, 6 и 7 клик не изменяется.

Научная новизна. Применение описанного метода позволяет не только устранить мультиколлинеарность признаков, но и осуществить отбор показателей и расширить возможности использования имеющегося набора данных за счет включения новых показателей, вносящих в модель новую полезную информацию о предметной области. Рассмотренный в работе метод отбора признаков для рационально использовать для построения интерпретируемых прогностических моделей показателей ВЭД.

6. Предложена новая методика аугментации данных, отличающаяся использованием методов признаковой аугментации данных на основе оценки характеристик временных рядов показателей внешнеэкономической деятельности, кластерного анализа и рекуррентных искусственных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью. Предложен подход к аугментации данных, позволяющий увеличить разнообразие набора данных без дополнительного сбора и включения в набор реальных данных, в целях увеличения объема выборки данных, необходимой для качественного обучения прогностической модели и предотвращения переобучения модели. Наиболее важным аспектом является возможность преобразования данных на основе имеющейся выборки и генерации новой выборки на основе признаков, поэтому необходим переход от работы с конкретными точками данных к их генерации на основе обобщения признаков, т.е. к **признаковой аугментации**. На рисунке 14 показан процесс формирования прототипов для обучения модели. Кроме модуля признаковой аугментации используется модуль восстановления и расширения изученных функций, который способен использовать информацию других экземпляров, входящих или не входящих в тот же класс.

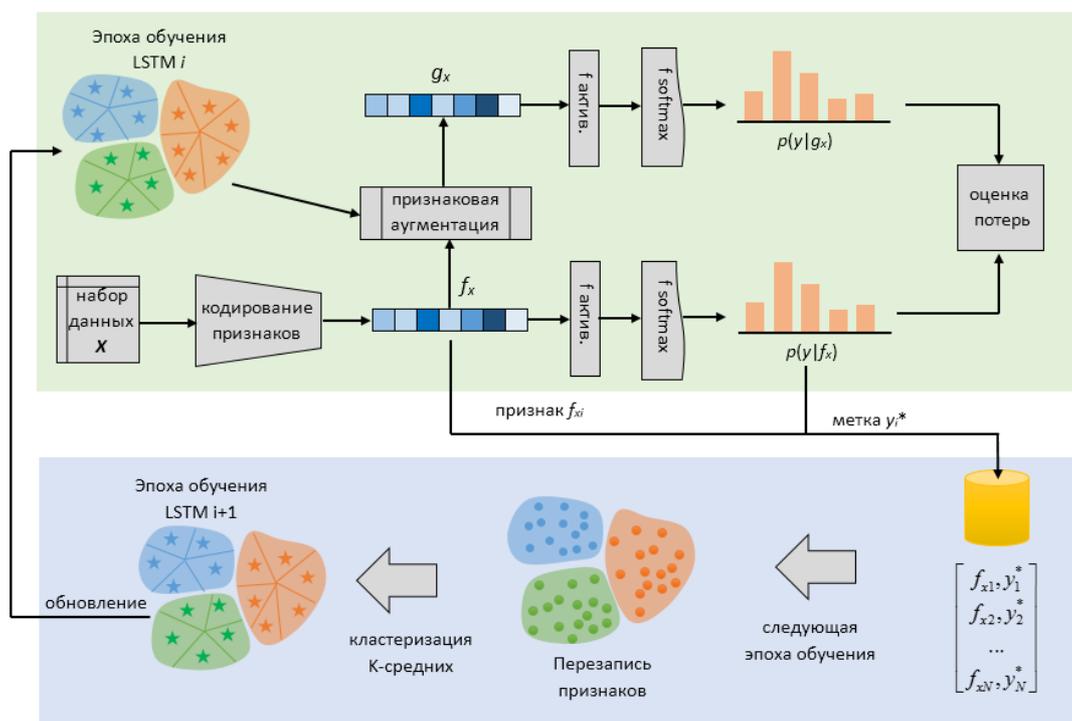


Рисунок 14 – Процесс формирования прототипов

Для полноценного решения задачи генерации прототипов цикл записи прототипа работает вместе с циклом обучения модели. Элементы набора f_{xi} , а также их псевдо-метки y_i^* , уже сгенерированные на каждой итерации цикла обучения, собираются и записываются в память в виде пар (f_{xi}, y_i^*) . Как только цикл обучения пройдет по всему набору данных, цикл записи запустит кластеризацию для извлечения прототипов для каждого класса и выполнит обновление прототипов набора и очистку памяти. Процедура является итеративной пока не будет достигнут приемлемый уровень потерь, т.е. сгенерированный набор будет достаточно точно описывать исходные данные. Модуль восстанавливает и дополняет входные объекты набора в пространстве признаков, используя знания прототипов.

Характеристики каждого элемента набора данных «смешивается» с характеристиками прототипов с помощью весовой функции, вычисленной на основе сходства объекта с каждым из прототипов. Для входного набора данных с извлеченными объектами f_x и i -м прототипом объектов $f_{p,i}$ сначала объект проецируется в пространство признаков с помощью функций φ_e , т.е. $e_x = \varphi_e(f_x)$ и $e_{p,i} = \varphi_e(f_{p,i})$, затем вычисляются веса w_i между e_x и $e_{p,i}$ с использованием функции softmax:

$$w_i = \text{softmax}(e_x^T e_{p,i}), \tag{15}$$

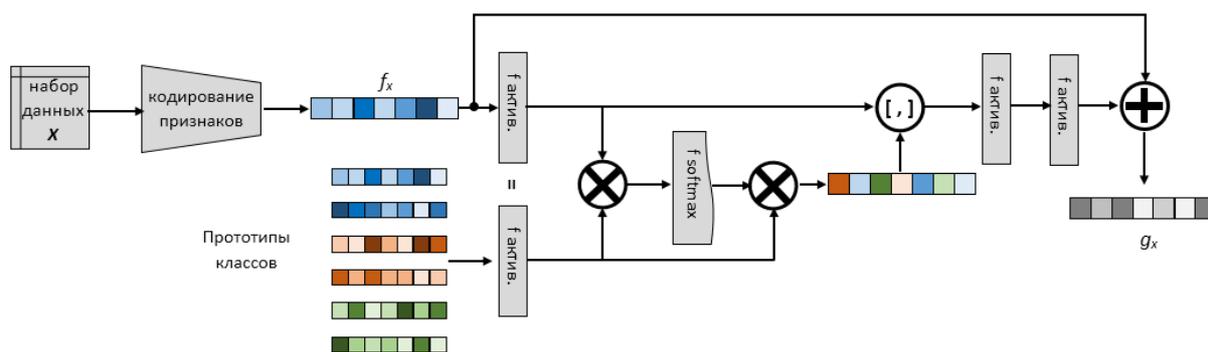


Рисунок 15 – Структура модуля признаковой аугментации данных

Функция softmax() нормализует веса сходства экземпляров для всех прототипов. Информация, собранная из прототипов и переданная в исходный набор для восстановления и аугментации признаков, может быть выражена как сумма признаков прототипа, перемноженных на весовые коэффициенты:

$$f_a = \text{relu} \left(\varphi_a \left(\left[e_x, \sum_i w_i e_{p,i} \right] \right) \right), \tag{16}$$

где φ_a – обучаемая функция на одной эпохе;

символ [,] – операция конкатенации признаков объекта;

оператор relu означает прохождение через слои ИНС с функцией активации одного из типов.

Входной набор признаков вычисляется как:

$$g_x = \text{relu} \left(f_x + \varphi_r(f_a) \right), \tag{17}$$

где φ_r – обученная функция на основе некоторого количества эпох.

Функция аугментации может быть обозначена как $g_x = AugF(f_x)$.

Научная новизна. Показанный модуль обеспечивает эффективный метод аугментации данных на основе признаков позволяет устранить ограничения традиционных методов аугментации данных и оценить потери между предсказанием на основе неаугментированных функций f_x и аугментированных функций g_x . Предложенная новая методика признаковой аугментации данных временных рядов на основе методов кластерного анализа отличается возможностью работы с короткими нестационарными временными рядами и также позволяет построить типовые шаблоны взаимосвязей между факторами в исходном наборе данных.

7. Разработан инструментальный метод прогноза показателей внешнеэкономической деятельности, отличающийся использованием алгоритма понижения размерности и отбора признаков, методов аугментации данных и автоматизированного машинного обучения для выбора моделей на основе ансамблевых методов. Обосновано применение инструментальных методов машинного обучения для выбора и построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности регионов. Показано, что методы автоматизации выбора алгоритмов машинного обучения для решения задачи предиктивной аналитики позволяют максимально реализовать потенциал известных алгоритмов.

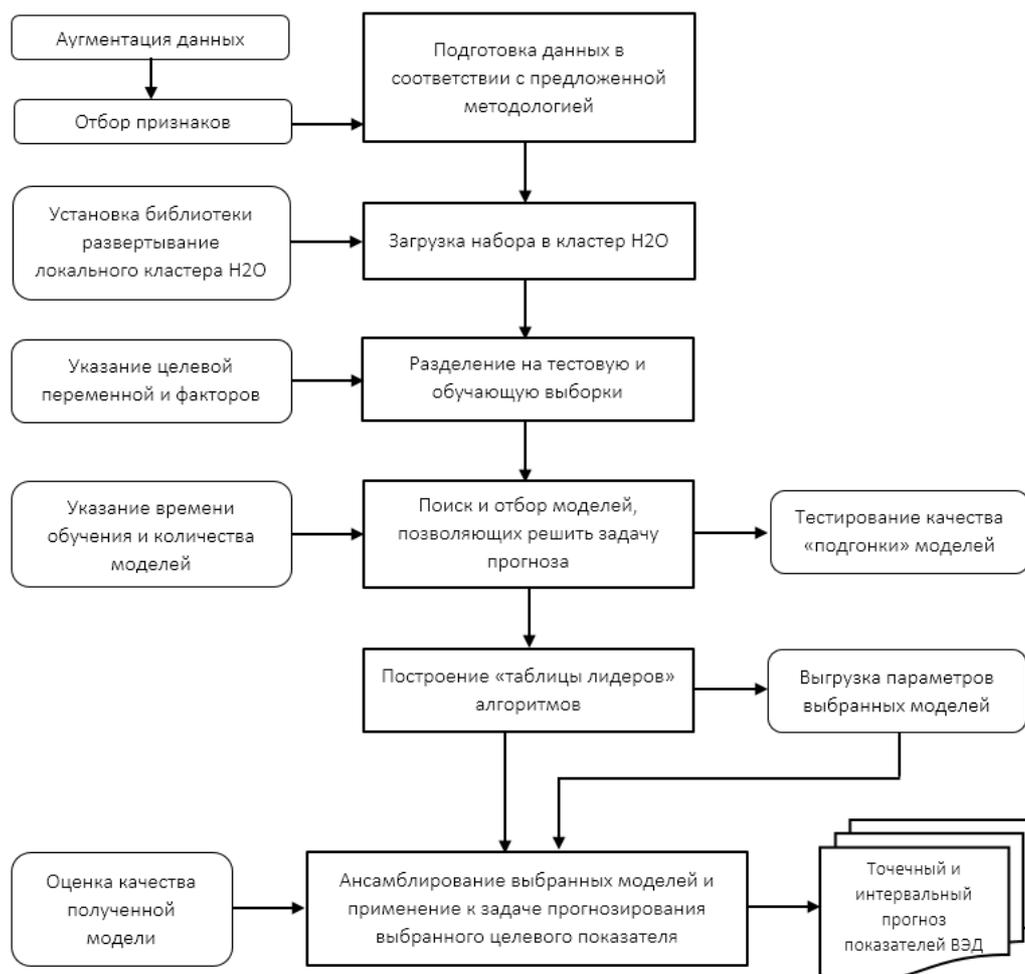


Рисунок 16 – Инструментальный подход применения автоматизированного машинного обучения для прогнозирования показателей ВЭД

Обоснованием выбора гибридных облачных решений и развернутых на них сквозных платформ для автоматизации выбора и тестирования моделей машинного обучения является более легкий способ конструирования и настройки моделей.

В работе показана реализация прогноза на платформе для автоматизации алгоритмов машинного обучения H2O AI Hybrid Cloud, представленных в виде отдельных пакетов и наборов библиотек, реализованных на языках программирования Python и R, которые позволяют выполнить автоматическое обучение и настройку многих моделей в течение заданного пользователем периода времени.

Следует отметить, что важной особенностью выбранной платформы для машинного обучения является возможность использования способа построения ансамблей алгоритмов машинного обучения. В работе показана возможность комбинирования алгоритмов на основе стекинга. Это позволит гибко настраивать модель и повысить ее качество для решения конкретной задачи.

Научная новизна. Предложенный подход позволяет реализовать подбор лучших моделей для прогнозирования показателей, представленных в форме динамических рядов на основе предварительно подготовленных данных за счет использования современных библиотек автоматизации подбора моделей, реализующего адаптивный подход к выбору модели для прогноза показателей ВЭД региона. Это позволяет получить комбинацию преимуществ отдельных моделей при решении задачи прогнозирования целевых показателей. Показана необходимость подготовки данных для использования в модели, состоящая из двух стадий: аугментации имеющегося набора данных и отбора признаков.

8. Разработан новый подход к построению рекомендаций по развитию направлений внешнеэкономической деятельности с использованием индекса выявленных сравнительных преимуществ (RCA), индекса экономической сложности (ESI) и индекса продуктовой сложности (PCI), отличающийся использованием индекса Джини продукта (PGI). В основе рекомендательной системы положена существующая методология экономической специализации регионов России, активно применяемая Институтом статистических исследований и экономики знаний Высшей школы экономики по разработке метода отраслевой специализации регионов. В отличие от известных методов, предложенный в диссертации подход позволяет оценивать и структурную изменчивость, которая также является фактором формирующим траекторию эволюции. Показатель энтропии Шеннона для оценки разнообразия регионального экспорта или импорта рассчитывается по формуле:

$$E = - \sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{P} \cdot \ln \frac{p_i}{P} \right) \quad (18)$$

где p_i – количество высокотехнологичных товаров i -й системной технологии;

P – общее количество товаров, экспортируемых регионом;

n – количество технологий производства товаров.

В дополнение к показателю энтропии Шеннона необходимо также оценить сбалансированность сообщества, т.е. оценить чувствительность целевого показателя к наиболее распространенным видам продукции. с помощью индекса Симпсона D , который является мерой доминирования определенной технологии:

$$D = \sum_{i=1}^n p_i (p_i - 1) / P(P - 1) \quad (19)$$

Исследователями Р. Хаусман и С. Ильдаго была предложена методика оценки объема капитала знаний через общее разнообразие количества товаров, которые экономика экспортирует и через количество стран, экспортирующих данный товар. Эта идея выражается в расчете индексов ЕСІ и РСІ, которые коррелируют с увеличением объема знаний и интеллектуального капитала на отдельной территории, что дает возможность оценить экономическую устойчивость выполняя расчет энтропии Шеннона E и обратного индекса Симпсона $1/D$ относительно продуктов, имеющих различные значения индекса продуктовой сложности РСІ, оценив тем самым технологическую устойчивость региона. Расчет энтропии Шеннона E и обратный индекс Симпсона $1/D$ относительно стран, имеющих различные значения показателя экономической сложности позволяет оценить глубину интеграции экономики региона с отдельно взятыми странами и встраивание региональной экономики в производственные цепочки других стран.

$$E_{PCI} = -\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{P} \cdot \ln \frac{p_i}{P} \right); \quad D_{PCI} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i (p_i - 1)}{P(P - 1)} \quad (20)$$

где p_i – количество высокотехнологичных товаров из общего количества товаров n , индекс продуктовой сложности которых превышает пороговое значение;

P – общее количество товаров, импортируемых/экспортируемых регионом.

С позиции оценки разнообразия внешнеэкономических связей региона и степени «глубины» взаимной интеграции экономики региона и экономики страны-партнера по импортному и/или экспортному транзиту рассчитываются индексы:

$$E_{ECI} = -\sum_{i=1}^m \left(\frac{c_i}{C} \cdot \ln \frac{c_i}{C} \right); \quad D_{ECI} = \frac{\sum_{i=1}^m c_i (c_i - 1)}{C(C - 1)} \quad (21)$$

где c_i – количество стран с высокой степенью взаимной интеграции из общего количества стран-партнеров по импортному и/или экспортному транзиту m , индекс экономической сложности которых превышает пороговое значение;

C – общее количество стран, взаимодействующих с регионом в направлении импорта и/или экспорта.

С учетом того, что индексы ЕСІ и РСІ рассчитываются на основе индекса выявленных сравнительных преимуществ РСА, предложенного Б. Балашшем (В. Balassa), то для отбора как товаров с высокой сложностью экспорта, так и стран с высокой степенью взаимного внешнеэкономического сотрудничества используется показатель РСА. Для повышения объективности использования описанных индексов при формировании рекомендаций по развитию внешнеэкономической деятельности в регионе, в работе предлагается исследовать взаимосвязь между экономической сложностью и неравенством доходов для стран, экспортирующих/импортирующих данный продукт с использованием индекса Джини продукта (PGI). Чтобы оценить неравенство доходов по каждому продукту,

PGI определяется как средний уровень неравенства доходов экспортеров продукта, взвешенный по важности каждого продукта в экспортной корзине страны.

$$PGI_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^m M_{cp} \cdot s_{cp} \cdot G_c \quad (22)$$

где G_c – Индекс Джини страны c ;

M_{cp} равен 1, если страна c экспортирует продукт p с выявленным сравнительным преимуществом, и 0 в противном случае;

s_{cp} – доля экспорта страны c , представленная продуктом p ;

N_p – нормализующий коэффициент

$$N_p = \sum_{i=1}^m M_{cp} \cdot s_{cp}; \quad s_{cp} = X_{cp} / \sum_{p=1}^n X_{cp} \quad (23)$$

где X_{cp} – общий объем экспорта/импорта продукта p по стране c .

Рекомендательный блок позволяет создавать и визуализировать рейтинг перспективных экспортных/импортных товаров на основе расчета показателей выявленного сравнительного преимущества. Отличается возможностью построения рейтинга на основе парного сравнения указанных показателей: среди других регионов РФ и среди стран мира, что позволяет определить потенциально перспективные товары для развития экспортного потенциала региона.

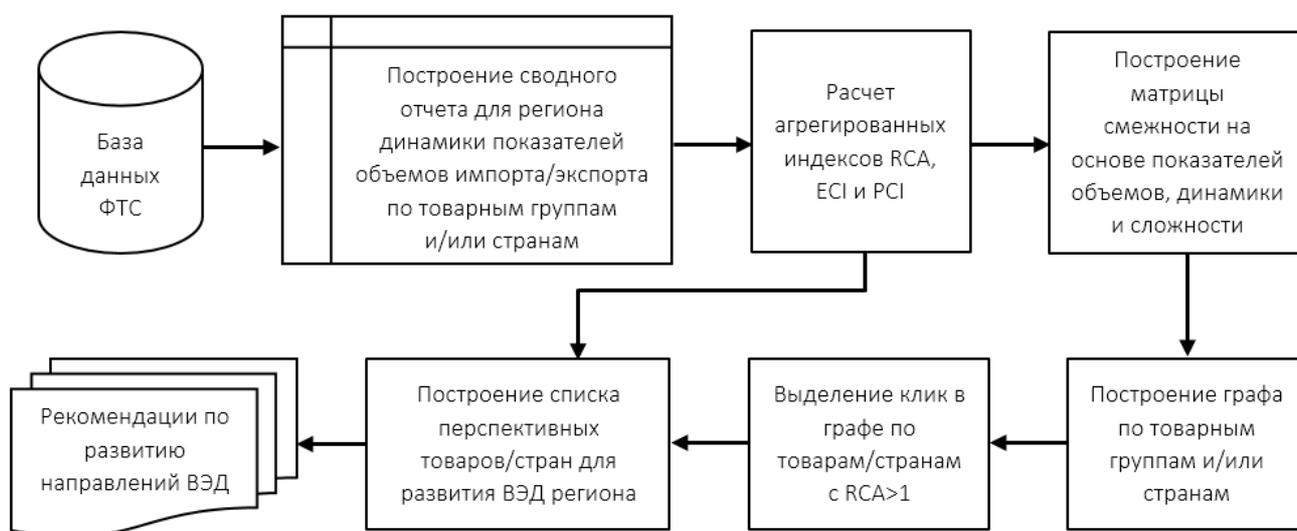


Рисунок 17 – Структура рекомендательного блока

Научная новизна. В работе предлагается использовать анализ индексов ЕСІ и РСІ для построения рекомендательной системы и описанию торгового профиля региона. Метод отличается от известных тем, что предлагается использовать индексы экономической и продуктовой сложности (ЕСІ и РСІ) для оценки потенциала региона при импорте и экспорте отдельных товарных групп из конкретных стран и коэволюции внешнеэкономических связей региона с учетом комплексного развития производственных технологий. Выявляется предпочтительная структура внешнеэкономических связей региона на основе графа и реализуется возможность прогнозирования на основе предложенных методов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленный в работе инструментарий апробирован в ООО «ВладВнешСервис» и ООО «Айди-маркетинг» в рамках сотрудничества лаборатории «Кластерного анализа процессов роста и эволюции систем» Владимирского филиала РАНХиГС при разработке мероприятий по проведению комплексного анализа внешнеторговых рынков России на основе таможенной статистики. Выполнена программная реализация отдельных методов, а также разработан прототип системы поддержки принятия решений, включающий программный модуль для построения прогностических моделей и проведения вычислительных экспериментов по точечному и интервальному прогнозированию показателей внешнеэкономической деятельности регионов, а также модуль построения рекомендаций по развитию основных направлений ВЭД в регионе, обеспечивающие реализацию разработанных в диссертационном исследовании положений.

При апробации подхода к описанию эволюционных изменений в структуре региональных внешнеэкономических связей решена задача применения графовых моделей и оценки локальной и глобальной связанности сетевых структур.

При апробации метода описания процесса нарушения симметрии в графовых моделях региональных внешнеэкономических связей решена задача выбора показателей для оценки локальной и глобальной симметрии графа на основе анализа клик в графе. Показана возможность оптимизации структуры графа с учетом сохранения высокой степени локальной связности.

При апробации инструментального метода построения графа с использованием алгоритма UMAP решена задача понижения размерности при построении сетевых структур, описывающих внешнеэкономические связи региона, а также реализован отбор признаков на основе оценки глобальной симметрии графа с использованием информационной энтропии и фрактальной размерности.

При апробации и верификации методологии использования новых подходов формирования графа региональных внешнеэкономических связей и оценки локальной симметрии графа для построения прогностических моделей показателей ВЭД, выявлена необходимость применения методов виртуального расширения статистической выборки и оценки устойчивости внешнеэкономических связей в динамике с учетом внутренних особенностей и внешних условий ведения внешнеэкономической деятельности на региональном уровне. Выполнена государственная регистрация программы для ЭВМ № 2021611745 от 04.02.2021

При апробации методики аугментации данных решена задача изучения признаков на основе оценки характеристик временных рядов путем перехода к признаковой аугментации данных, с применением алгоритмов кластерного анализа и искусственных нейронных сетей на архитектуре LSTM. Выполнена государственная регистрация программы для ЭВМ № 2021660685 от 30.06.2021.

При апробации инструментального метода прогноза показателей внешнеэкономической деятельности, решена задача применения методов построения графа с использованием алгоритма UMAP, оценки локальной и глобальной симметрии графа, аугментации данных и автоматизированного машинного обучения точечного и интервального прогнозирования выбранных целевых показателей ВЭД.

Результатом применения указанного метода является автоматизированный подбор алгоритмов для прогнозирования выбранного целевого показателя на основе признаков. Сформирована «таблица лидеров» – набор алгоритмов, позволяющий оценить какие базовые алгоритмы лучше справились с поставленной задачей с применением ансамблевых методов, а именно – стекинга. На основе выбранных алгоритмов выполнено обучение модели для прогнозирования целевого показателя и дана оценка характеристик точности модели (рисунок 18).



Рисунок 18 – Пример выбора моделей для прогнозирования (а) и тестирования обученной модели (б) для объемов экспорта в стоимостном выражении товаров группы ТН ВЭД №70 (Стекло и изделия из него) по Владимирской области

При этом средняя ошибка аппроксимации составляет 8,19% при использовании аугментации данных, в отличии от значения средней ошибки аппроксимации в 12,36% без использования аугментации данных.

При апробации подхода к построению рекомендаций по развитию направлений внешнеэкономической деятельности решена задача построения графа на основе расчета индексов RCA, ECI и PCI, а также индекс Джини продукта (PGI) решена задача создания рейтинга перспективных экспортных товаров региона. Построен прототип рекомендательной системы выбора перспективных направлений развития торгового профиля региона (рисунок 19).



Рисунок 19 – Пример результаты построения рекомендаций

Предложенная методология формирует расчет рейтинговых показателей перспективных экспортных/импортных товаров регионов России по отношению к другим регионам России и странам мира. Практическая реализация разработок позволила повысить объективность экспертно-аналитических процедур по выбору лучших товаров для импорта и экспорта, поиска перспективной рыночной ниши, расширения товарной матрицы и получению точных прогнозов о рыночной ситуации для включения в маркетинговый план по реализации проекта развития производства товаров и услуг на территории регионов России. Выполнена государственная регистрация программы для ЭВМ № 2022611622 от 28.01.2022.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный в диссертации анализ условий реализации внешнеэкономической деятельности регионов позволил выявить ключевые факторы, оказывающие влияние на выбор методов планирования и прогнозирования внешнеэкономической деятельности регионов. Результаты анализа отечественного и зарубежного опыта построения прогностических моделей предполагают использование графовых методов для описания структуры региональных внешнеэкономических связей,

системного подхода для описания процессов изменчивости сетевых структур. Основой для разработки научно-методического аппарата послужила необходимость перспективного анализа направлений изменчивости внешнеторговых рынков и разработка, отраслевого торгового профиля региона, позволяющего оценить возможности и направления развития региональной инновационной политики.

2. Результаты изучения и обобщения актуальных научных подходов к планированию и прогнозированию внешнеэкономической деятельности регионов и обзора существующих научных работ показали, что в данной области исследования имеются системные методологические проблемы, обусловленные противоречием между новыми потребностями практики прогнозирования показателей внешнеэкономической деятельности регионов, и ограничениями используемого научно-методического обеспечения, что свидетельствует об актуальности его совершенствования. Исследование потенциала эволюции с учетом эффекта нарушения симметрии позволяют дать оценку условиям ведения внешнеэкономической деятельности, дать рекомендации по развитию направлений внешнеэкономической деятельности региона и спрогнозировать целевые показатели.

3. Выдвинута гипотеза диссертации, в соответствии которой, выполнена постановка научной задачи исследования и ее математическая формализация. Она сводится к созданию единой методологии, позволяющую реализовать прогнозирование путем построения рекомендаций по развитию и оценке перспективных направлений внешнеэкономической деятельности на региональном уровне; реализации прогноза количественных показателей внешнеэкономической деятельности регионов России, в том числе по выявленным перспективным направлениям, а именно: по изменению объемов импорта/экспорта, динамики агрегированных показателей в разрезе стран и/или групп товаров.

4. В целях решения поставленной научной задачи разработан научно-методический аппарат для построения прогностических моделей внешнеторговой деятельности регионов в виде комплекса взаимосвязанных авторских методик и подходов: описания внешнеторговых связей регионов на основе графовых моделей; описания эволюционных изменений в структуре внешнеэкономических связей регионов с учетом эффекта нарушения симметрии и оценки локальной связанности сетевых структур; инструментального метода построения графа с использованием алгоритма UMAP; отбора признаков и параметризации графа на основе оценки глобальной симметрии графа с использованием информационной энтропии и фрактальной размерности; признаковой аугментации данных и построения прогностических моделей с использованием методов автоматизированного машинного обучения, а также построения рекомендаций по развитию направлений внешнеэкономической деятельности на основе расчета индексов RCA, ECI и PCI.

5. Для практической реализации научно-методического аппарата разработаны инструменты: открытые библиотеки для анализа данных (pandas, numpy) и машинного обучения (tensorflow, keras, scikitlearn и др.) на языках программирования Python и R, а также платформы машинного обучения H2O.

6. Апробация научно-методического аппарата построения прогностических моделей внешнеторговой деятельности регионов и внедрение инструментов в виде программных продуктов выполнены на предприятии ООО «ВладВнешСервис»,

ООО «Айди-маркетинг», использованы в работе управления внешнеэкономической деятельности департамента экономического развития Администрации Владимирской области, а также в некоммерческой организации Торгово-промышленная палата Владимирской области. Результаты диссертации позволили обосновать управленческие решения, обеспечивающие повышение эффективности управления внешнеэкономической регионов.

7. Результаты разработки научно-методического аппарата и реализации практических инструментов позволяют сделать заключение о том, что поставленная научная задача решена, а цель диссертации достигнута. Диссертационное исследование обеспечивает разработку методологии построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности с использованием эффекта нарушения симметрии, обеспечивающих повышение эффективности управления внешнеэкономической деятельностью регионов. Направлениями дальнейших исследований по проблематике диссертации является интеграция разработанного инструментария с существующими и перспективными решениями в области стратегического планирования внешнеэкономической деятельности регионов. Ряд разработанных методов носит универсальный характер и может быть использован для расширения инструментов анализа временных рядов и отбора признаков.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Исследование теории групп нарушенной симметрии в природных, биологических и социально-экономических системах / В.Г. Рау, К.А. Горшков, С.В. Поляков, Т.Ф. Рау, А.Н. Кисляков, И.А. Тогунов, Н.Е. Тихонюк: Монография. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2020. 261 с. (15 п.л./ 2,14 п.л.)

Научные статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS и WoS

2. Method of Complex Analysis of Time Series to Predict the Dynamics of Changes in Product Groups in Foreign Economic Activity / A.N. Kislyakov, N.E. Tikhonyuk, N.M. Filimonova, D.V. Kochanov, A.A. Susina // Imitation Market Modeling in Digital Economy: Game Theoretic Approaches. ISC 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 368. P. 408-415. (0,92 п.л. / 0,18 п.л.).

3. Kislyakov A.N. Structuring advertising campaign costs considering the asymmetry of users' interests // Business Informatics. 2020. Vol. 14, № 4. P. 7-18. (1,39 п.л.).

4. Kislyakov A., Tikhonuyk N. Principles for Development of Predictive Stability Models of Social and Economic Systems on the basis of DTW // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 208. Art. No. 08001. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/68/e3sconf_ift2020_08001.pdf (1,0 п.л. / 0,5 п.л.).

5. Nikitin O.R., Kislyakov A.N. Fractal analysis of information content of multispectral images in problems of ecological monitoring // Theoretical and Applied Ecology. 2019. № 2. P. 32-38. (0,81 п.л. / 0,4 п.л.).

**Научные статьи в рецензируемых журналах,
рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (08.00.13)**

6. Кисляков А.Н. Эволюционный подход к управлению развитием внешнеэкономической деятельности регионов // Мягкие измерения и вычисления. 2022. №2(51). С. 58-68 (1,0 п.л.).

7. Кисляков А.Н. Графовые методы описания торгового профиля региона. Управленческое консультирование. 2022. №2. С. 70-80. (1,0 п.л.).

8. Кисляков А.Н. Отбор признаков для использования в моделях предиктивной аналитики внешнеэкономической деятельности регионов // Прикладная математика и вопросы управления. 2022. № 1. С. 176-195. (1,0 п.л.).

9. Кисляков А.Н., Тихонюк Н.Е. Выбор метода сегментирования клиентской базы в условиях информационной асимметрии // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 2. С. 46-52. URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1596>. (0,81 п.л. / 0,4 п.л.).

10. Кисляков А.Н. Бутстрэп-регрессия на основе максимума энтропии в задачах прогнозирования социально-экономических показателей // Прикладная математика и вопросы управления. 2021. №1. С. 156-173. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.09. (2,1 п.л.).

11. Кисляков А.Н., Тихонюк Н.Е. Маркетинговое использование методов машинного обучения: обзор направлений применения // Экономика и предпринимательство. 2021. № 3(128). С. 653-657. DOI: 10.34925/ EIP.2021.128.3.128. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

12. Кисляков А.Н., Поляков С.В. Иерархические методы кластеризации в задаче поиска аномальных наблюдений на основе групп с нарушенной симметрией // Управленческое консультирование. 2020. № 5 (137). С. 116-127. DOI: 10.22394/1726-1139-2020-5-116-127 (1,39 п.л. / 0,69 п.л.).

13. Кисляков А.Н. Асимметрия информации в задачах анализа социально-экономических процессов // Вестник НГУЭУ. 2020. № 1. С. 64-75. DOI: 10.34020/2073-6495-2020-1-064-075. (1,39 п.л.).

14. Кисляков А.Н. Графовая кластеризация поведенческой активности пользователей продукта с учетом информационной асимметрии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2020. Т. 10. № 3. С. 152-163. (1,39 п.л.).

15. Кисляков А.Н. Показатели асимметрии в задачах изучения поведенческой активности пользователей продукта // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2020. № 3(123). С. 110-116. (0,8 п.л.).

16. Кисляков А.Н. Имитационное моделирование оптимальной цены предложения в контрактной системе государственных и муниципальных закупок // Управленческое консультирование. 2019. № 5 (125). С. 53-62. DOI: 10.22394/1726-1139-2019-5-53-62. (1,16 п.л.).

17. Кисляков А.Н. Метод виртуального увеличения выборки при прогнозировании редких продаж в условиях информационной асимметрии // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 1-2. С. 47-54. (0,92 п.л.).

18. Кисляков А.Н. Интеллектуальный анализ потребительского спроса в условиях информационной асимметрии // Современная экономика: проблемы и решения. 2019. № 10 (118). С. 8-17. DOI: 10.17308/mers.2019.10/2221 (1,16 п.л.).

19. Кисляков А.Н. Оценка эффективности рекламной кампании в социальных сетях с использованием методов имитационного моделирования // Экономика и управление: проблемы, решения. 2019. Т. 5, № 3. С. 20-26. (0,81 п.л.).

20. Кисляков А.Н., Савельев И.И. Исследование математических методов анализа и оценки качества государственных и муниципальных услуг, предоставляемых в электронном виде // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 3, № 10. С. 48-52. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

21. Кисляков А.Н., Тихонюк Н.Е. Построение прогностических моделей развития экспортного потенциала сельского хозяйства владимирской области // Journal of Agriculture and Environment. 2022. №1(21). С. 20-27. (1 п.л. / 0,5 п.л.).

22. Кисляков А.Н. Алгоритм бинарной классификации на основе графов принятия решений в задачах кредитного скоринга // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 1(37). С. 29-41. DOI: 10.21685/2227-8486-2021-1-3. (1,5 п.л.).

23. Кисляков А.Н. Проблемы построения прогностических моделей показателей внешнеэкономической деятельности предприятий текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2021. №4(394). С. 37-42 DOI: 10.47367/0021-3497_2021_4_37. (0,69 п.л.).

24. Кисляков А.Н. Модель поведения участников розничного рынка топлива в условиях информационной асимметрии // Экономические отношения. 2019. Т. 9. № 1. С. 219-234. DOI: 10.18334/eo.9.1.39936. (1,85 п.л.).

25. Кисляков А.Н., Тихонюк Н.Е. Модель ценообразования однородного рынка с учетом асимметричности информации / Инновационное развитие экономики. 2019. № 1 (49). С. 93-100. (0,92 п.л. / 0,46 п.л.).

26. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Метод идентификации личности по цифровым изображениям отпечатков пальцев / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4 (28). С. 52-57. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.).

27. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Анализ информационного содержания цифровых многоспектральных изображений земной поверхности / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 2 (22). С. 64-69. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.).

28. Никитин О.Р. Кисляков А.Н. Метод иерархической кластеризации цифровых многоспектральных изображений в задачах экологического мониторинга // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4. С. 49-57. DOI 10.24412/2221-2574-2021-444-49-56. (1,04 п.л. / 0,52 п.л.).

Научные статьи и тезисы докладов в сборниках трудов международных и всероссийских конференций

29. Filimonova M., Kislyakov A., Tikhonyuk N. Structural and Dynamic Modelling of the Regions' Foreign Trade Profile Based on Graph Cluster Analysis //

STRATEGICA: Shaping the Future of Business and Economy. Bucharest. October 2021. P. 34-49. (1,85 п.л. / 0,62 п.л.).

30. Кисляков А.Н. Прикладные аспекты использования автоматизированного машинного обучения для создания прогностических моделей социально-экономических показателей // Региональная экономика: опыт и проблемы (Владимир, 12 мая 2021 г.): мат. XI международной научно-практ. Конференции / Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2021. С. 193-204. (1,39 п.л.).

31. Кисляков А.Н. Концепция признаковой аугментации для обеспечения конфиденциальности данных в моделях трансфертного обучения // Проблемы информационной безопасности государства, общества и личности (Владимир, 7 окт. 2021 г.): мат. междунар. научно-практ. конференции / Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2021. С.76-87 (1,39 п.л.).

32. Kislyakov A.N., Filimonova N.M., Omarova N.Y. Development of Predictive Models of Socio-Economic Systems Based on Decision Trees with Multivariate Response // Proceedings of International Scientific and Practical Conference «Russia 2020 – a new reality: economy and society» (ISPCR 2020). Advances in Economics, Business and Management Research. 2021. Vol.164. P. 198-203. DOI: 10.2991/aebmr.k.210222.039 (1 п.л. / 0,33 п.л.).

33. Кисляков А.Н. Особенности построения прогностических моделей внешнеэкономической деятельности в рамках международного сотрудничества стран ЕАЭС // Мемлекеттік басқару және мемлекеттік қызмет Халықаралық ғылыми-талдау журналы. 2021. №2(77). С. 85-94. DOI: <https://doi.org/10.52123/1994-2370-2021-224>. (1,16 п.л.).

34. Кисляков А.Н. Показатели асимметрии в описании сложных взаимодействий социально-экономических систем // Региональная экономика: опыт и проблемы (Владимир, 15 мая 2020 г.): мат. XIII междунар. научно-практ. конференции / Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2020. С. 94-104. (1,27 п.л.).

35. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Показатели симметрии в кластерном анализе сложных систем // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020 (Владимир-Суздаль 1-3 июл. 2020 г.): труды XIV междунар. научн. конференции с научной молодежной школой им. И.Н. Спиридонова / Владимир: ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2020. С. 168-172. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

36. Принцип нарушения симметрии в моделях развития экономических систем / В.Г. Рау, А.Н. Кисляков, Н.Е. Тихонюк, Т.Ф. Рау // Региональная экономика: опыт и проблемы (Владимир, 15 мая 2018 г.): мат. XI междунар. научно-практ. конференции / Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2018. С. 201-211. (1,16 п.л. / 0,29 п.л.).

37. Тихонюк Н.Е., Кисляков А.Н. Экономические модели работы с асимметрией информации: эволюция подходов // Региональная экономика: опыт и проблемы (Владимир, 15 мая 2018 г.): мат. XI междунар. научно-практ. конференции / Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2018. С. 236-244. (1,04 п.л. / 0,52 п.л.).

38. Математическая модель сборки дендримеров для нанофармакологии / В.Г. Рау, А.Н. Кисляков, Т.Ф. Рау, К.А. Герасимов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (Владимир-Суздаль, 3-5 июл. 2018 г.): труды XIII междунар.

научн. конференции с научной молодежной школой имени И.Н. Спиридонова / М.: ООО «Графика», 2018. С. 247-250. (0,46 п.л. / 0,115 п.л.).

39. Кисляков А.Н. Фрактальный анализ в задачах прогнозирования социально-экономических процессов // Новая экономика и региональная наука. 2018. № 1(10). С. 36-39. (0,46 п.л.).

40. Кисляков А.Н. Использование фрактальной размерности в техническом анализе рынка криптовалют // Ученые записки. 2018. № 1(25). С. 101-105. (0,58 п.л.).

41. Кисляков А.Н. Влияние фильтрации Фурье на точность прогноза социально-экономических показателей // Ученые записки. 2017. № 2(22). С. 78-82. (0,58 п.л.).

42. Кисляков А.Н. Имитационное моделирование деятельности многофункциональных центров предоставления государственных и муниципальных услуг // Ученые записки. 2017. № 3(23). С. 21-24. (0,46 п.л.).

43. Кисляков А.Н. Модель информационного взаимодействия в сфере туризма на региональном уровне // Ученые записки. 2017. № 1(21). С. 13-15. (0,35 п.л.).

44. Кисляков А.Н. Фрактальный метод идентификации личности по цифровым изображениям отпечатков пальцев // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017 (Суздаль, 5-7 июл. 2017): мат. 12-ой междунар. научно-техн. конференции / Владимир: ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2017. С. 200-204. (0,58 п.л.).

Свидетельства на программы для ЭВМ

45. Программное обеспечение для прогнозирования экономических показателей с использованием бутстрап-регрессии на основе максимума энтропии: свид. 2021611745 РФ / А.Н. Кисляков; заявл. 21.01.2021; опубл. 04.02.2021.

46. Программное обеспечение для прогнозирования признаков аугментации данных, представленных в виде временных рядов: свид. 2021660685 РФ А.Н. Кисляков; заявл. 16.06.2021; опубл. 30.06.2021.

47. Программное обеспечение для создания рейтинга перспективных экспортных товаров региона: свид. 2022611622 РФ / А.Н. Кисляков, Н.Е. Тихонюк, Д.В. Кочанов, А.А. Сусина; заявл. 03.12.2021; опубл. 28.01.2022.