

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 330.43: 519.237

МАЛЮГИН
Владимир Ильич

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И
ФИНАНСОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора экономических наук
по специальности 08.00.13 – математические и инструментальные
методы экономики

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный консультант – **Харин Юрий Семенович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, академик НАН Беларуси,
директор НИИ прикладных проблем
математики и информатики
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Комков Василий Никифорович**,
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры аналитической экономики
и эконометрики экономического факультета
Белорусского государственного университета;

Пересецкий Анатолий Абрамович,
доктор экономических наук, профессор,
профессор-исследователь департамента при-
кладной экономики факультета экономиче-
ских наук НИУ «Высшая школа экономики»;

Сошникова Людмила Антоновна,
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры статистики
УО «Белорусский государственный
экономический университет».

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение
«Научно-исследовательский экономический
институт Министерства экономики
Республики Беларусь».

Защита состоится 5 апреля 2022 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.05 при Белорусском государственном университете по адресу: 220030, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Телефон ученого секретаря: 375 17 351 85 21, e-mail: karachun@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « » марта 2022 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
к.э.н., доцент

И.А. Карачун

ВВЕДЕНИЕ

Эконометрическими моделями называются вероятностно-статистические модели, описывающие механизмы функционирования экономических или финансовых процессов. Эконометрический подход, т.е. подход на основе эконометрических моделей, традиционно применяется для анализа, прогнозирования и оптимизации решений в таких областях как: макро- и микроэкономика, финансовые рынки, денежно-кредитная политика и банковская сфера. Новым направлением развития эконометрического подхода, порожденным цифровизацией экономики, является сочетание традиционных эконометрических методов анализа и моделирования с методами статистического и машинного обучения и технологиями анализа больших данных, включая большие массивы *микроданных (firm-level data)*, формируемых на уровне субъектов экономических отношений^{1,2,3}.

Реальные экономические процессы характеризуются большим числом взаимосвязанных переменных и развиваются под влиянием различных факторов, что обуславливает необходимость их описания с помощью *многомерных эконометрических моделей*. Существенные изменения условий функционирования экономических процессов вследствие различных «шоковых» воздействий являются причиной «*структурных изменений моделей*» (*structural breaks*), которые проявляются в скачкообразных изменениях параметров (*параметрическая неоднородность*) либо функциональной формы (*функциональная неоднородность*) моделей и ведут к неоднородности *эндогенно-экзогенной структуры* и модели случайных ошибок наблюдения (*межгрупповой гетероскедастичности ошибок*).

Особую актуальность проблема структурной неоднородности имеет при эконометрическом моделировании процессов в развивающихся экономиках. Об этом свидетельствуют результаты исследований, включая работы: В.В. Харемзы, С.Б. Макаровой (экономика стран центральной и восточной Европы); С.А. Айвазяна, С.А. Анатольева, М.Ю. Афанасьева, В.А. Балаша, Ю.Н. Благовещенского, Б.Е. Бродского, А.Е. Варшавского, И.И. Елисеевой, В.Л. Макарова, В.С. Мхитаряна, А.А. Пересецкого (российская экономика); Э.М. Аксенья, М.В. Демиденко, М.М. Ковалева, В.Н. Комкова, М.К. Кравцова, С.Ф. Миксюк, Н.Л. Мирончик, С.С. Полоника, Г.В. Савицкой, С.А. Самаля, Л.А. Сошниковой, О.А. Тихонова, Ю.С. Харина, Г.А. Хацкевича (белорусская экономика).

Состояния экономического процесса «до» и «после» структурного изменения интерпретируются как различные *режимы* или *классы состояний*. В диссертационной работе используются два типа многомерных данных с неоднородной структурой, обусловленной существованием различных классов состояний экономических процессов: многомерные временные ряды и панельные микроданные.

¹ Use of big data sources and applications at central banks // IFC Report No 13, 2021.

² Bok, B. Macroeconomic Nowcasting and Forecasting with Big Data / B. Bok, D. Caratelli // Annual Review of Economics. – 2018. – №10(1). – P. 73-81.

³ Winkelmann, R. Analysis of Microdata / R. Winkelmann, S. Boes. – Springer, 2006. – 342 p.

Наибольший интерес в контексте макроэкономического анализа экономической активности и финансовой стабильности представляет случай двух классов состояний, соответствующих «спаду» (включая фазы цикла «замедление», «рецессия») и «росту» (включая фазы цикла «восстановление», «расширение») экономической активности.

Спады экономической активности порождают различные системные риски и негативно отражаются на финансовой стабильности и кредитоспособности реального сектора экономики. В указанных условиях, в соответствии с рекомендациями Базельского комитета⁴, монетарная политика должна основываться на принятии *контрциклических мер* (*countercyclical measures*), направленных на сохранение устойчивости банковского сектора при поддержке реального сектора экономики. Эффективность таких мер определяется ранней идентификацией текущей фазы цикла и предвидением начала очередной фазы. Применение для этих целей традиционных эконометрических и аналитических моделей, основанных на ограничительных упрощающих модельных предположениях, не представляется возможным в силу их структурной неоднородности в условиях шоковых воздействий. В качестве альтернативы в настоящее время формируется новое направление в разработке макроэкономических моделей, основанное на эмпирическом моделировании с использованием методов статистического и машинного обучения на основе больших массивов данных, которые в целом демонстрируют лучшую согласованность с экономической теорией⁵. К числу таких моделей относятся многомерные эконометрические модели с переключением состояний.

Известные одномерные и многомерные (векторные) авторегрессионные модели с марковскими переключениями состояний (*Markov Switching – MS*) MS-AR (Дж. Гамильтон, 1989), MS-VAR (Г.-М. Кролзиг, 1997) основаны на следующих ключевых предположениях *о типе структурных изменений*, приводящих к смене классов состояний: 1) структурные изменения в свободных членах моделей; 2) структурные изменения в средних значениях временных рядов. Для построения указанных моделей используются алгоритмы совместного оценивания параметров моделей, переходных вероятностей и номеров классов состояний по неклассифицированной выборке наблюдений в режиме самообучения. Современные модификации данных моделей допускают включение экзогенных переменных. Однако главное назначение традиционных моделей с марковскими переключениями состояний моделей – это датировка поворотных точек бизнес-цикла. Для повышения точности оценивания поворотных точек используются модификации моделей, в которых переходные вероятности зависят от экзогенных переменных, подверженных циклическим изменениям. Это ведет к существенному усложнению моделей и затрудняет их применение в условиях ограниченного объема данных и отсутствия в развивающихся экономиках необходимой информационной базы. Альтернативой в этих случаях могут быть модели MS-VARX

⁴ Basel Committee on Banking Supervision. Basel III: A global regulatory framework for more resilient banks and banking system. – Bank for International Settlements, December 2010 (rev. June 2011). – Mode of access: <http://www.bis.org/publ/bcbs189.pdf>. – Date of access: 19.12.2020.

⁵ Hendry, D.F. The future of macroeconomics: macro theory and models at the Bank of England / D.F. Hendry, J.N.J. Muellbauer // *Oxford Review of Economic Policy*, Oxford University Press. – 2018. – Vol. 34(1–2). – P. 287–328.

и MS-MLR с включенными в них экзогенными переменными с циклическими изменениями, которые улучшают статистические свойства и прогностические способности моделей. В случае, когда модель зависимости номеров классов не учитывается (предположение об однородности марковской модели нарушается), целесообразно применять модели с *независимыми переключениями* классов состояний IS-VARX и IS-MLR (*Independence Switching – IS*). Если датировка поворотных точек за исторический временной интервал установлена статистическими или экспертными методами, актуальными являются алгоритмы дискриминантного анализа указанных моделей в режиме обучения, которые предназначены для оценивания текущего класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных для различных классов состояний по новым наблюдениям. Методы дискриминантного анализа для всех вышеописанных типов моделей отсутствуют в известных эконометрических пакетах. Для модели IS-MLR в условиях обучения и самообучения методы построения впервые были предложены В.И. Малюгиным и Ю.С. Хариным⁶.

Диссертационная работа в целом посвящена решению комплекса задач, связанных с построением многомерных эконометрических моделей временных рядов и панельных данных, описывающих механизм функционирования экономических и финансовых процессов при наличии циклических структурных изменений, обусловленных существованием различных классов состояний. Для построения многомерных эконометрических моделей с параметрической и функциональной неоднородностью в случае «независимых» и «циклических» структурных изменений разработан общий подход, основанный на применении оптимальных в смысле минимума вероятности ошибочной классификации байесовских *статистических решающих правил классификации* в режиме обучения (статистического обучения) и самообучения (машинного обучения). Теория статистической классификации многомерных данных развита в работах А.С. Айвазяна, А. Джейна, Р. Дуина. Ю. Какизава, Д. Пуарье, К. Фукунаги, Д. Харта. Л. Баума и С. Уэлча. Построению робастных методов статистической классификации и прогнозирования при наличии искажений гипотетической вероятностной модели наблюдений посвящены работы Ю.С. Харина, Е.Е. Жука, К.А. Дучинскаса, П. Фильцмозера и др.

Эффективность всех предлагаемых методов оценена с использованием разработанного программного обеспечения на тестовых модельных данных. На основе реальных данных с использованием разработанных программных средств продемонстрирована эффективность предлагаемых методик анализа и прогнозирования экономической активности и финансовой стабильности белорусской экономики, что дает основание использовать их при выработке комплексных мер в области денежно-кредитной и надзорной политики, а также экономической политики в целом с целью раннего выявления системных рисков, причин и источников их возникновения. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

⁶ Малюгин, В.И. Об оптимальности классификации случайных наблюдений, различающихся уравнениями регрессии / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 7. – С. 61–69.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.

Тема диссертационного исследования соответствует направлениям научных исследований: «Информационно-коммуникационные, авиационные и космические технологии и аппаратура» (подраздел «Методы математического и компьютерного моделирования, компьютерные технологии и интеллектуальные системы поддержки принятия решений»); «Социально-экономическое и духовно-культурное развитие Республики Беларусь» (подраздел «Теоретические основы повышения эффективности национальной инновационной системы, антикризисные и посткризисные механизмы обеспечения устойчивого развития национальной экономики»); «Междисциплинарные исследования. Перспективные зарождающиеся технологии» (подраздел «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук»), определенным Перечнем приоритетных направлений научных и научно-технических исследований Республики Беларусь на 2011–2015 и 2016–2020 годы.

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении в Белорусском государственном университете (БГУ) следующих научно-исследовательских работ (НИР):

1) две НИР по ГНТП «Экономика и социальная политика» (1997–2000 гг.): «Разработать математическое и программное обеспечение эконометрического моделирования и прогнозирования динамики важнейших макроэкономических параметров» (проект 04.06, № ГР 19973433); «Разработать эконометрические модели для прогнозирования экономических индикаторов и оценки вариантов макроэкономического регулирования экономики в условиях переходного периода» (проект 17, № ГР 20002184);

2) НИР по проекту Г00Р-006 БРФФИ (2001–2003 гг.) «Построение и анализ индикаторов социально-экономического развития, прогноз и оценка вариантов экономической политики в переходном периоде экономик Беларуси и России (модельное, математическое, программное и информационное обеспечение (№ ГР 20015213);

3) НИР по ГКПНИ «Инфотех» (2006–2010 гг.): «Разработка методов, алгоритмов и программных средств статистического прогнозирования процессов в сложных стохастических системах» (№ ГР 20062205);

4) две НИР по ГПНИ «Конвергенция» и «Конвергенция–2020» (2011–2016 гг.): «Разработка методов робастного статистического анализа случайных последовательностей и полей при наличии неоднородностей и цензурирования» (№ ГР 20111047); «Разработка вероятностных моделей, методов и алгоритмов статистического анализа и прогнозирования дискретных временных рядов» (№ ГР 20162616);

5) три Международных научных и образовательных проекта: INTAS 03-51-3714. «*Nonstationary multivariate and nonlinear econometric models: theory and applications*» (2003–2007 гг.); REAP BEL/395/41/007 «*Development of training programmes and materials for preparing of analysts in economics for Government organizations in transition economy*» (1998–2002 гг.); 544609-Tempus-1-2013-1-AT-Tempus-JPCR «*Applied Computing in Engineering and Science*» (2013–2016 гг.);

6) четыре НИР БГУ (2001–2020 гг.): «Разработка математических моделей, методов и алгоритмов статистического анализа неоднородных данных и их применение в компьютерных системах моделирования и обработки информации» (№ ГР 20002116); «Статистический анализ данных сложной структуры и его применения в компьютерных системах моделирования и обработки информации» (№ ГР 20062641); «Робастные статистические выводы и их применение в компьютерных системах моделирования и анализа данных» (№ ГР 20120355); «Разработка вероятностно-статистических моделей, методов и алгоритмов компьютерного анализа данных сложной структуры» (№ ГР 20162503);

7) шесть НИР по хозяйственным договорам с Национальным банком Республики Беларусь (2003-2018 гг.): «Эконометрическое моделирование взаимосвязей между инструментами Национального банка и промежуточными и конечными показателями денежно-кредитной политики для целей разработки сценариев денежно-кредитного регулирования» (№ ГР 20041380); «Развитие и совершенствование системы эконометрических моделей для целей разработки сценариев проведения денежно-кредитной политики» (№ ГР 20066152); «Оценка кредитоспособности предприятий с использованием экономико-математических, эконометрических методов и моделей на основе данных системы мониторинга предприятий Национального банка Республики Беларусь» (№ ГР 20121220); «Разработка системы опережающих экономических индикаторов и экономических диффузных индексов для основных видов экономической деятельности и экономики Республики Беларусь в целом с использованием экономико-математических, эконометрических методов и моделей на основе данных системы мониторинга предприятий Национального банка Республики Беларусь» (№ ГР 20162817); «Актуализация статистической методики оценки кредитоспособности предприятий с использованием экономико-математических, эконометрических методов и моделей на основе данных системы мониторинга предприятий Национального банка Республики Беларусь» (№ ГР 20162586); «Разработка модельного инструментария для оценки и прогнозирования кредитного риска банков на микроуровне» (№ ГР 20171979).

Автор диссертации являлся научным руководителем шести НИР (пункт 7), ответственным исполнителем четырех НИР (пункты 1, 2, 3) и исполнителем девяти НИР (пункты 4-6).

Цель и задачи исследования. *Целью диссертационной работы* является разработка методов построения многомерных эконометрических моделей временных рядов и панельных данных с неоднородной параметрической и функциональной структурой, обусловленной сменой классов состояний экономических процессов, на основе статистических решающих правил в режиме обучения и самообучения, а также методик их применения для анализа экономической активности и финансовой стабильности белорусской экономики, которые в совокупности развивают новый подход в эконометрическом анализе и прогнозировании макроэкономических показателей в условиях циклических структурных изменений, обусловленных шокowymi воздействиями на экономику. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие *задачи*:

1. Разработать методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний экономических процессов в режиме обучения, предназначенных для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных для различных классов состояний по текущим одиночным и групповым наблюдениям.

2. Разработать методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний, предназначенных для оценивания моментов переключения классов состояний (датировки поворотных точек цикла) и прогнозирования экономической активности в режиме самообучения.

3. Разработать методы построения модели динамической многомерной линейной регрессии с автокоррелированными ошибками в случае независимых переключений состояний, обобщающие известные методы оценивания одномерных динамических моделей линейной регрессии и предназначенные для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных по текущим одиночным и групповым наблюдениям в режиме обучения.

4. Разработать методы построения модели многомерной непараметрической регрессии с независимыми переключениями состояний в режиме обучения, предназначенной для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных на основе многомерных нелинейных моделей с функциональной неоднородностью.

5. Разработать методику построения и применения эконометрических моделей с марковскими переключениями состояний и разработанным опережающим статистическим индикатором по опросным панельным данным для оценивания поворотных точек цикла экономической активности и прогнозирования темпов роста белорусской экономики.

6. Разработать методику статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микроуровне (уровне организаций) и макроуровне (уровне видов экономической деятельности (ВД) и реального сектора экономики в целом) по неоднородным панельным данным финансовой отчетности организаций и заданным критериям риска дефолта в режиме обучения и самообучения.

Объектом исследования являются эконометрические модели временных рядов и панельных данных с неоднородной структурой для целей прогнозирования макроэкономических показателей экономической активности и финансовой стабильности экономики в условиях циклической смены классов состояний.

Предмет исследования – методы построения и методики применения многомерных эконометрических моделей временных рядов и панельных данных с неоднородной структурой, обусловленной существованием различных классов состояний экономики.

Научная новизна. В диссертационной работе разработан новый подход в эконометрическом анализе и прогнозировании макроэкономических показателей в условиях циклических структурных изменений, обусловленных шоковыми воздействиями на экономику. Предлагаемый подход основывается на разработанных методах построения многомерных эконометрических моделей временных рядов и панельных микроданных с неоднородной параметрической и функциональной структурой, обусловленной сменой классов состояний экономики, реализующих статистические решающие правила в режиме обучения и самообучения, а также методиках их применения для анализа экономической активности и финансовой стабильности белорусской экономики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний экономических процессов в режиме обучения по классифицированной выборке, предназначенных для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных для различных классов состояний по текущим наблюдениям.

Разработанные методы и алгоритмы дискриминантного анализа многомерных авторегрессионных и регрессионных наблюдений реализуют оптимальные в смысле минимума вероятности ошибки решающие правила и позволяют оценивать класс состояния, а также строить сценарные прогнозы макроэкономических индикаторов для различных классов состояний на основе оцененных моделей в режиме поступления новых одиночных или групповых наблюдений. Эффективность методов доказана на тестовых модельных данных.

2. Новые методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний, предназначенных для оценивания моментов переключения классов состояний

(поворотных точек циклов) и прогнозирования экономической активности в режиме самообучения.

Предлагаемый подход предполагает включение в модель экзогенных переменных с циклическими структурными изменениями и не требует задания типа структурных изменений. В отличие от традиционных подходов, предназначенных для оценивания поворотных точек цикла на всем периоде наблюдения, предлагаемый подход позволяет повысить точность прогнозов, а также создает возможности для оптимизации структуры модели с помощью методов машинного обучения. Эффективность разработанных методов доказана на тестовых модельных данных.

3. Новые методы построения моделей динамической многомерной линейной регрессии с автокоррелированными ошибками в случае независимых переключений состояний, обобщающие известные методы оценивания одномерных динамических моделей линейной регрессии и предназначенные для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных по текущим одиночным и групповым наблюдениям в режиме обучения.

Разработанные методы расширяют возможности использования регрессионных моделей с переключением состояний на многомерный случай, когда методы оценивания моделей не допускают использование лаговых эндогенных переменных для учета автокорреляции ошибок. Эффективность методов доказана на тестовых модельных данных.

4. Новые методы построения модели многомерной непараметрической регрессии с независимыми переключениями состояний в режиме обучения, предназначенные для классификации состояний и прогнозирования экономических процессов на основе многомерных нелинейных моделей с функциональной неоднородностью.

Разработанные методы дают возможность использовать регрессионные модели с переключением состояний в случае нелинейных зависимостей между экономическими переменными, параметрический вид которых не известен. Эффективность методов доказана на тестовых модельных данных.

5. Новая методика построения и применения эконометрических моделей с марковскими переключениями состояний и разработанным опережающим статистическим индикатором по опросным панельным данным для оценивания поворотных точек цикла экономической активности и прогнозирования темпов роста белорусской экономики.

Разработанная методика дает комплексное решение задач, связанных с разработкой и применением опережающих индикаторов по микроданным в эконометрических моделях с марковскими переключениями состояний, предназначенных для анализа циклов экономической активности и прогнозирования темпов экономического роста для альтернативных сценариев развития белорусской экономики. Эффективность методики доказана с использованием макроэкономических данных белорусской экономики и панельных микроданных ежемесячных

опросов предприятий четырех видов экономической деятельности (ВД) в рамках системы мониторинга предприятий Национального банка Республики Беларусь.

б. Новая методика статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микроуровне (уровне организаций) и макроуровне (уровне ВД и реального сектора экономики в целом) по неоднородным панельным данным финансовой отчетности организаций и заданным критериям риска дефолта в режиме обучения и самообучения.

Методика применима в условиях, когда традиционные подходы, основанные на моделях неоднородных панельных данных бинарного и множественного выбора, не применимы – отсутствует статистика по дефолтам организаций и классифицированная по степени кредитного риска обучающая выборка организаций. Построенные в рамках разработанной методики статистические показатели кредитоспособности и финансовой стабильности имеют опережающий характер по отношению к показателям устойчивости банковской системы и экономической активности, что позволяет проводить анализ кредитоспособности и финансовой стабильности с целью раннего выявления кредитных рисков в реальном секторе экономики и оценки их влияния на финансовую стабильность и экономическую активность отдельных ВД и реального сектора экономики в целом. Эффективность методики доказана с использованием данных квартальной финансовой отчетности, получаемых в рамках системы мониторинга белорусских предприятий Национального банка Республики Беларусь.

Личный вклад соискателя. Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. В совместных публикациях другим соавторам принадлежат результаты, не вошедшие в диссертационную работу. Аспиранткой Н.В. Гринь разработана методика построения статистических показателей кредитоспособности, оптимизированная в рамках предлагаемой общей методики анализа финансовой стабильности. Аспирантом А.Ю. Новопольцевым разработаны программы, реализующие предлагаемые в работе методы построения моделей MS-VARX и MS-MLR, а также программная реализация методик анализа кредитоспособности и финансовой стабильности. Результаты аспирантов М.В. Прановича и А.Ю. Миксюка не связаны с решаемыми в работе задачами. Студенты в совместных публикациях участвовали в проведении численных экспериментов в соответствии с заданным планом.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты диссертации регулярно представлялись на заседаниях Республиканского научного семинара кафедры математического моделирования и анализа данных БГУ и Научно-исследовательского института прикладных проблем математики и информатики «Математическое моделирование сложных систем, анализ данных и защита информации» (1991–2020 гг.), а также на следующих научных конференциях: Республиканская научная конференция «Компьютерный анализ данных и моделирование» (Минск, 1993, 1998), International Conference

«Computer data analysis and modeling – CDAM» (Minsk, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013, 2016, 2019), Международная научная конференция «Проблемы актуарной и финансовой математики» (Минск, 2000, 2002), Международная научная конференция «Математические методы в финансах и эконометрика» (Минск, 2002), International Vilnius Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics (Vilnius, 2002), Международная научная конференция «Информационные системы и технологии» (Минск, 2002, 2009, 2010), Международный конгресс по информатике CSIST (Минск, 2011, 2013, 2016), научная конференция «Информационное образование» (Минск, 2014), Международная научно-практическая конференция «Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества» (Москва, 2014), Белорусская математическая конференция (Минск, 2008, 2012, 2016, 2021), Международная научная конференция «Проблемы прогнозирования и государственного регулирования» (Минск, 2005, 2007–2021), Международная научная конференция «Устойчивое развитие экономики: состояние, проблемы и перспективы» (2008, Пинск), Международная научная конференции «Математическое моделирование и дифференциальные уравнения» (Минск, 2009), Международная научная конференция «Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и их приложения» (Минск, 2008, 2010, 2014, 2015), Международная научно-практическая конференция «Белорусская статистика: вчера, сегодня, завтра» (Минск, 2010), Международная научно-практическая конференция «Математическое моделирование в экономике, страховании и управлении рисками» (Саратов, 2012, 2013, 2021), International Conference «Pattern Recognition and Information Processing (PRIP)» (Minsk, 2019), EURO mini-conference on Logistics Analytics (Minsk, 2018), Международный форум по банковским информационным технологиям «БАНКИТ-2019» (Минск, 2019); Международная конференция «Тенденции экономического развития XXI века» (Минск, 2020); IV Российский экономический конгресс (Москва, 2020), XI Международная школа-семинар «Многомерный статистический анализ, эконометрика и моделирование реальных процессов» (Москва, 2020); VIII Международная конференция «Modern Econometric Tools and Applications – META2021» (Нижний Новгород, 2021).

Опубликованность результатов диссертации. Содержание диссертации опубликовано в 111 научных работах, из них: 1 монография (17,4 авт. листа); 37 статей в научных журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республики Беларусь, 6 статей в зарубежных научных журналах (общий объем 35 авт. листов); 8 статей в других научных изданиях, 49 статей в сборниках материалов научных конференций, 10 тезисов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, семи глав основного текста, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертации составляет 291 страницу, в том числе: 34 рисунка и 39 таблиц на 31 странице, приложение на 16 страницах. Библиографический список на 24 страницах насчитывает 296 наименований, включая собственные публикации автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** представлен аналитический обзор основных типов многомерных эконометрических моделей с неоднородной структурой, обусловленной сменой классов состояний экономических процессов, а также методов их построения. Предлагаются расширения моделей многомерных временных рядов и панельных данных со скрытой марковской зависимостью классов состояний. Формулируются задачи построения данных моделей в режимах обучения и самообучения, а также задачи их практического применения при анализе экономической активности и финансовой стабильности.

В **разделе 1.1** дается общая характеристика многомерных эконометрических моделей и форм их представления [1].

В **разделе 1.2** формулируются основные типы многомерных эконометрических моделей с однородной структурой регрессионного и авторегрессионного типа, включая модели MLR, VAR, VARX. Для каждой модели приводится формула для совместной условной плотности распределения значений вектора эндогенных переменных, используемая в задаче статистического оценивания параметров модели.

В **разделе 1.3** вводится определение параметрической и функциональной структурной неоднородности.

В **разделе 1.4** дается общая характеристика проблемы структурных изменений, приводится описание задач анализа эконометрических моделей с множественными структурными изменениями и основных подходов к их решению. Описываются методы построения одномерных и многомерных моделей с множественными структурными изменениями в случае известных и неизвестных моментов структурных изменений. Получено общее представление для базовой модели VARX с множественными структурными изменениями во всех параметрах, основанное на использовании фиктивных переменных [1, 25]. Обсуждаются возможности применения современных концепций кобрейкинга и коинтеграции временных рядов в многомерных моделях с множественными структурными изменениями.

В **разделе 1.5** вводятся используемые в диссертационной работе модели с переключением состояний и формулируются решаемые задачи. В **подразделах 1.5.1, 1.5.2** дается обзор моделей временных рядов с переключением состояний, описывается их эволюция и опыт практического использования в задачах анализа макроэкономических процессов и финансовых рынков.

В **подразделе 1.5.3** дается определение используемым базовым моделям MS-VARX и IS-VARX [1]. Предполагается, что экономический процесс может находиться в одном из L ($L \geq 2$) классов состояний $\{\Omega_0, \dots, \Omega_{L-1}\}$. Номер класса состояния описывается дискретной случайной величиной $d_t \equiv d(t) \in S(L) = \{0, \dots, L-1\}$. Экономическая система для всего периода наблюдения описывается вектором состояний $D = (d_t) \in S^T(L)$ ($t = 1, \dots, T$).

Модели MS-VARX и IS-VARX векторной авторегрессии с переключением состояний порядка p с M экзогенными переменными и L ($L \geq 2$) классами состояний в случае полных структурных изменений определяются формулой [1]:

$$x_t = \sum_{i=1}^p A_{d(t),i} x_{t-i} + B_{d(t)} z_t + \eta_{d(t),t}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (1)$$

где $x_t = (x_{ti}) \in \mathfrak{R}^N$ – вектор эндогенных переменных, $x_{1-p}, \dots, x_0 \in \mathfrak{R}^N$ – заданные начальные значения; $z_t = (z_{tj}) \in \mathfrak{R}^M$ – вектор экзогенных переменных, $\eta_{d(t),t} \in \mathfrak{R}^N$ – вектор случайных ошибок наблюдения (*innovation process*); $\{A_{d(t),l}\} (l = 1, \dots, p)$ – $(N \times N)$ -матрицы коэффициентов авторегрессии при лаговых эндогенных переменных; $B_{d(t)}$ – $(N \times M)$ -матрица коэффициентов регрессии при экзогенных переменных.

Модельные предположения:

М.1. Модель удовлетворяет условию структурной параметрической неоднородности

$$A_\alpha \neq A_\gamma \text{ и (или) } B_\alpha \neq B_\gamma \quad \forall \alpha \neq \gamma, \alpha, \gamma \in S(L).$$

М.2. Значения экзогенных переменных $z_t = (z'_{t1}, \dots, z'_{tM})' \in \mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}^M$ ($t = 1, \dots, T$)

являются заданными, а $(M \times M)$ -матрица $\sum_{t=1}^T z_t z'_t$ не вырождена.

Для каждого класса состояний Ω_α ($\alpha \in S(L)$) выполняются предположения:

М.3. Ошибки наблюдения $\{\eta_{\alpha,t}\}$ ($t = 1, \dots, T$) являются независимыми, распределёнными по нормальному закону случайными векторами с нулевым вектором математического ожидания и невырожденной ковариационной матрицей Σ_α :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{\eta_{\alpha,r}\} &= 0_N \in \mathfrak{R}^N, \mathbf{E}\{\eta_{\alpha,r} \eta'_{\alpha,s}\} = \delta_{r,s} \Sigma_\alpha \quad (r, s = 1, \dots, T, \alpha \in S(L)), \\ \eta_{\alpha,t} &\sim \mathbf{IN}(0_N, \Sigma_\alpha) \quad (t = 1, \dots, T), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\delta_{r,s}$ – символ Кронекера, 0_N – нулевой вектор-столбец.

М.4. Матрицы $\{A_{\alpha,l}\}$ ($l = 1, \dots, p$) удовлетворяют условию стационарности модели VAR(p) [1].

Таким образом, рассматриваются кусочно-стационарные модели с L *переключающимися классами состояний*, для которых $2 \leq L < s$, где $s \geq 1$ – число структурных изменений, соответствующих смене классов состояний, в неизвестные моменты времени («поворотные точки») $1 < \tau_1 < \dots < \tau_s < T$.

Для номеров классов состояний $d_t \in S(L)$ ($t = 1, \dots, T$) возможны условия:

П.1. d_t ($t = 1, \dots, T$) – *однородная эргодическая цепь Маркова* (ОЦМ) с вектором априорных (эргодических) вероятностей классов состояний π и матрицей вероятностей одношаговых переходов P соответственно:

$$\pi = (\pi_l), \pi_l = \mathbf{P}\{d_1 = l\} > 0 (l \in S(L)), \sum_{l \in S(L)} \pi_l = 1;$$

$$P = (p_{kl}), p_{kl} = \mathbf{P}\{d_{t+1} = l \mid d_t = k\} \geq 0 (k, l \in S(L)), \sum_{l \in S(L)} p_{kl} = 1, k \in S(L); \quad (3)$$

П.2. $d_t (t = 1, \dots, T)$ – независимые в совокупности случайные величины с распределением вероятностей $P\{d_t = l\} = \pi_l > 0 (l \in S(L)), \sum_{l \in S(L)} \pi_l = 1$.

Модель (1) в предположениях М.1–М.4, П.1, П.2 допускает представление в виде модели многомерной линейной регрессии [30, 33]:

$$x_t = \Pi_{d(t)} u_t + \eta_{d(t),t}, \quad (4)$$

где $\Pi_{d(t)} = (A_{d(t),1}, \dots, A_{d(t),p}, B_{d(t)})$ – блочная матрица параметров размерности $N \times (pN + M)$; $u_t = (x'_{t-1}, \dots, x'_{t-p}, z_t)' \in \mathfrak{R}^{Np+M}$ – составной вектор «предопределенных» переменных, значения которых известны к моменту времени t включительно.

При условии П.1 модель (1) называется *моделью с марковскими переключениями состояний MS-VARX*, а в случае П.2 – *моделью с независимыми переключениями состояний IS-VARX*. Частными случаями модели (1) при $M = 0$ является модель *векторной авторегрессии без экзогенных переменных MS-VAR* и *IS-VAR*. При $p = 0$ из (1) получается модель *многомерной линейной регрессии с марковскими или независимыми переключениями состояний MS-MLR* и *IS-MLR*, которые в случае полных циклических структурных изменений имеют вид:

$$x_t = B_{d(t)} z_t + \eta_{d(t),t}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5)$$

где номера классов состояний $d(t) \in S(L)$ ($t = 1, \dots, T$) удовлетворяют соответственно условиям П.1 или П.2.

В отличие от моделей MS-AR и MS-VAR, предложенных в работах Дж. Гамильтона и Г.-М. Кролзига^{7,8}, рассматриваемая модель MS-VARX включает экзогенные переменные и не требует априорного задания типа модели циклических изменений.

В подразделе 1.5.4 разработана многомерная модель динамической линейной регрессии с независимыми переключениями состояний IS-MLR-VAR вида [13]:

$$x_t = B_{d(t)} z_t + \xi_{d(t),t}, \xi_{d(t),t} = \sum_{l=1}^p A_l \xi_{d(t),t-l} + \eta_{d(t),t}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (6)$$

где для класса $l \in S(L)$: $\xi_{l,t} \in \mathfrak{R}^N$ – случайный вектор, описываемый моделью VAR(p); $\eta_{l,t} \in \mathfrak{R}^N$ – случайный вектор, удовлетворяющий условиям (2).

Модель (6) для каждого класса состояний $d(t) \in S(L)$ удовлетворяет предположениям М.1–М.4 и П.2. Данная модель расширяет возможности использования

⁷ Hamilton, J. D. A new approach to the economic analysis of nonstationary time series and the business cycle / J. D. Hamilton // *Econometrica*. – 1989. – №57(2). – P. 357–384.

⁸ Krolzig, H.-M. Markov switching vector autoregressions, Modelling statistical inference and application to business cycle analysis / H.-M. Krolzig, Springer-Verlag, 1997. – 360 p.

регрессионных моделей с переключением состояний, методы построения которых не допускают включение в модель лаговых эндогенных переменных для устранения автокорреляции остатков.

В подразделе 1.5.5 разработана многомерная модель непараметрической регрессии IS-MNPR с функциональной неоднородностью и независимыми переключениями $L \geq 2$ классов состояний, имеющая вид [1, 18, 23]

$$F_{d(t)}(y_t) = x_t - f_{d(t)}(z_t) = \xi_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (7)$$

где для класса состояний $d(t) \in S(L)$ процесс описывается вектором эндогенных переменных $x_t \in \mathfrak{X} \subset \mathfrak{R}^N$ ($N \geq 2$), полученным для заданных значений экзогенных переменных $z_t \in \mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}^M$ ($M \geq 1$); $\xi_t = (\xi_{it}) \in \mathfrak{R}^N$ – случайный вектор ошибок, для которого $\mathbf{E}\{\xi_{it}\} = 0$, а дисперсии $\mathbf{D}\{\xi_{it}\} = \sigma_i$ ($i = 1, \dots, N$) близки к нулю.

Номера классов $d_t \equiv d(t) \in S(L)$ удовлетворяют условию независимости классов состояний П.2, а неизвестные векторные функции $\{f_l(z)\}$ – условию функциональной неоднородности $f_k(z) \neq f_l(z)$, $\forall z \in \mathfrak{Z}$, $k \neq l, k, l \in S(L)$.

При сделанных предположениях распределение вероятностей составного случайного вектора регрессионных наблюдений $y_t' = (x_t', z_t') \in \mathfrak{R}^n$ ($n = N + M$) для различных классов состояний близко к вырожденному, то есть концентрируется вблизи нелинейных гиперповерхностей в n -мерном пространстве (при $n = 2$ – линий регрессии), что затрудняет использование известных непараметрических оценок плотностей распределения и функции регрессии, а также основанных на них непараметрических решающих правил классификации многомерных наблюдений.

В разделе 1.6 разработана модель панельных микроданных с неоднородной структурой, обусловленной сменой классов состояний экономических процессов.

В подразделе 1.6.1 обосновывается актуальность применения больших массивов структурированных микроданных в практике центральных банков для решения задач анализа экономической активности и финансовой стабильности.

В подразделе 1.6.2 разработана модель панельных микроданных с неоднородной кластерной структурой, используемая для решения задач, указанных в подразделе 1.6.1. Пусть в момент времени t ($t = 1, \dots, T$) объект i ($i = 1, \dots, n$), относящийся к некоторому виду $\{G_k\}$ ($k = 1, \dots, K$) (далее указанный объект обозначается тройкой (i, t, k)), описывается случайным N -мерным вектором наблюдений, образованным из значений анализируемых признаков:

$$x_{i,t}^{(k)} = (x_{i1,t}^{(k)}, \dots, x_{iN,t}^{(k)})' \in \mathfrak{X}^N \quad (i = 1, \dots, n^{(k)}, t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, K). \quad (8)$$

По степени выраженности некоторого основного свойства объекты могут быть отнесены к одному из L классов $\Omega_0, \dots, \Omega_{L-1}$. Указанное свойство выражается дискретной переменной $d \in S(L) = \{0, 1, \dots, L-1\}$. Для заданной тройки (t, k, i) значение переменной d обозначается $d_{i,t}^{(k)} \in S(L)$.

Полная информация об объекте (i, t, k) определяется случайным вектором

$$z_{i,t}^{(k)} = \begin{pmatrix} x_{i,t}^{(k)} \\ d_{i,t}^{(k)} \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^N \times S(L) \quad (i=1, \dots, n_t^{(k)}, t=1, \dots, T). \quad (9)$$

Пространство наблюдений \mathfrak{X} для различных типов данных определяется следующим образом: $\mathfrak{X} = [0, \infty)$ для непрерывных данных; $\mathfrak{X} = \{-1, 0, +1\}$ для дискретных данных. Предполагается, что переменная $d \in S(L)$ является ненаблюдаемой (латентной) и описывается дискретной случайной величиной, относительно которой для фиксированного значения k и всех возможных значений i делается предположение: $d_{i,t}^{(k)} \in S(L)$ ($i=1, \dots, n^{(k)}$) – ОЦМ с параметрами:

$$\pi^{(k)} = (\pi_1^{(k)}, \dots, \pi_L^{(k)})', \quad \pi_l^{(k)} = \mathbf{P}\{d_{i,0}^{(k)} = l\} > 0, l \in S(L), \quad (10)$$

$$P^{(k)} = (p_{rs}^{(k)}), \quad p_{rs}^{(k)} = \mathbf{P}\{d_{i,t}^{(k)} = s \mid d_{i,t-1}^{(k)} = r\} \geq 0, t=1, \dots, T. \quad (11)$$

В подразделе 1.6.3 формулируются решаемые в работе прикладные задачи анализа панельных микроданных с неоднородной кластерной структурой.

В разделе 1.7 формулируются задачи анализа экономических процессов с различными классами состояний в режиме «обучения» (статистического обучения), когда вектор состояний $D = (d_t) \in S^T(L)$ ($t=1, \dots, T$) известен, и «самообучения» (машинного обучения) в противном случае.

В главе 2 решается задача 1 по разработке методов статистической классификации многомерных авторегрессионных и регрессионных наблюдений на основе векторных авторегрессионных моделей с экзогенными переменными MS-VARX и IS-VARX и многомерных регрессионных моделей IS-MLR и MS-MLR в случае марковских и независимых переключений классов состояний в режиме обучения.

В разделе 2.1 представляются методы дискриминантного анализа (ДА) наблюдений, описываемых моделью IS-MLR в предположениях М.1-М.3 и П.2. Формулируется задача ДА, которая заключается в оценивании номера класса состояния экономического процесса $d \in S(L) = \{0, 1, \dots, L-1\}$, $L \geq 2$ по наблюдению $(x, z) \in \mathfrak{X} \times \mathfrak{Z} \subseteq \mathfrak{R}^n$. Предлагаются решающие правила классификации состояний и определяются критерии их оптимальности в форме вероятностей ошибок классификации. Вводится понятие оптимального байесовского решающего правила (БРП). В условиях задачи статистического обучения предлагается подстановочное БРП (ПБРП) $d_T(x; z)$, в котором используются оценки параметров модели по классифицированной выборке. Получены аналитические представления для вероятности ошибки и оценки вероятности ошибки ПБРП [1].

В разделе 2.2 разработаны методы ДА для векторной авторегрессионной модели IS-VARX с независимыми переключениями состояний и экзогенными переменными в предположениях М.1-М.4. Предлагаются решающие правила групповой и поточечной классификации наблюдений для $L \geq 2$ классов состояний. Для двух классов состояний проводится сравнительный анализ вероятностей ошибочной классификации ПБРП $d_T(x; z)$ для моделей IS-VARX и IS-MLR [25].

В разделе 2.3 разработан алгоритм ДА для моделей с марковскими переключениями состояний MS-VARX в предположениях М.1-М.4, П.1 в случае полных структурных изменений. В рамках предлагаемого метода используется представление модели MS-VARX в виде модели многомерной линейной регрессии [30]:

$$x_t = \Pi_{d(t)} u_t + \eta_{d(t),t}, \quad (12)$$

где $\Pi_{d(t)} = (A_{d(t),1}, \dots, A_{d(t),p}, B_{d(t)})$ – блочная матрица параметров размерности $N \times (pN + M)$; $u_t = (x'_{t-1}, \dots, x'_{t-p}, z_t)' \in \mathfrak{R}^{Np+M}$ – составной вектор предопределенных переменных, образованный из лаговых и экзогенных переменных, значения которых известны к моменту времени t включительно.

Формулируется задача и предлагается решающее правило групповой классификации серии многомерных авторегрессионных наблюдений (\bar{X}, \bar{U}) , где $\bar{X} = (x'_1, \dots, x'_T)' \in \mathfrak{R}^{NT}$ – временной ряд эндогенных переменных, соответствующий временному ряду предопределенных переменных $\bar{U} = (u'_1, \dots, u'_T)' \in \mathfrak{R}^{NpT} \times \mathfrak{Z}^T \subseteq \mathfrak{R}^{(Np+M)T}$. Решающее правило допускает общее описание: $\hat{D} = (\hat{d}_t) = D(\bar{X}, \bar{U})$, где $\hat{d}_t = \hat{d}_t(\bar{X}, \bar{U}) \in S(L)$ – номер класса состояния процесса в момент времени t ($t = 1, \dots, T$). Точность решающего правила характеризуется вероятностью ошибки классификации r для серии наблюдений (\bar{X}, \bar{U}) , определяемой как

$$r = r(D(\bar{X}, \bar{U})) = P\{\|\hat{D} - D^0\| \neq 0\}, \|\hat{D} - D\| = \sum_{t=1}^T (1 - \delta_{\hat{d}_t, d_t^0}), \quad (13)$$

где $D^0 = (d_t^0)$, $\hat{D} = (\hat{d}_t)$ – соответственно истинный вектор состояний и его оценка.

Лемма 2.4. [30, 33] *Если модель (12) удовлетворяет предположениям М.1-М.4, П.1 и значение составного вектора параметров модели $\phi \in \mathfrak{R}^q$, включающего параметры VARX-моделей $\{\theta_t\}$ и параметры ОЦМ π, P , известны, то решающее правило групповой классификации серии наблюдений (\bar{X}, \bar{U}) , определяемое как*

$$\hat{D} \equiv \hat{D}(\bar{X}, \bar{U}) = \arg \max_{D \in S^T(L)} l(\phi; \bar{X}, \bar{U}, D), \quad (14)$$

основанное на максимизации логарифмической функции правдоподобия, минимизирует вероятность ошибки классификации r вида (13).

Для решения задачи целочисленной оптимизации (14) по $D \in S^T(L)$ применяется метод динамического программирования.

Теорема 2.6. [30, 33] *В условиях леммы 2.4 БРП групповой классификации временного ряда $\bar{X}_1^T = (x'_1, \dots, x'_T)' \in \mathfrak{R}^{NT}$, соответствующего временному ряду предопределенных переменных $\bar{U}_1^T = (u'_1, \dots, u'_T)' \in \mathfrak{R}^{NpT} \times \mathfrak{Z}^T \subseteq \mathfrak{R}^{(Np+M)T}$, реализуется с помощью процедуры динамического программирования согласно формулам:*

$$\hat{d}_T = \arg \max_{k \in S(L)} F_T(k), \hat{d}_t = \arg \max_{k \in S(L)} (f_t(k, \hat{d}_{t+1}) + F_t(k)), t = T-1, T-2, \dots, 1, \quad (15)$$

$$F_1(l) \equiv 0, F_{t+1}(l) = \max_{k \in S(L)} (f_t(k, l) + F_t(k)), l \in S(L), t = 1, \dots, T-1,$$

где $\{F_t(k)\}$ – функции Беллмана, а функции $\{f_t(k, l)\}$ определяются формулами $f_t(k, l) = \delta_{t,1} (\ln \pi_k + \ln p_X(x_1; u_1, \theta_k)) + \ln p_{kl} + \ln p_X(x_{t+1}; u_{t+1}, \theta_l)$, $k, l \in S(L)$, $\delta_{t,1}$ – символ Кронекера, $t = 1, \dots, T-1$.

Если $\{\hat{\theta}_l\}$ ($l \in S(L)$), $\hat{\pi}$, \hat{P} – оценки параметров модели MS-VARX вида (1) по классифицированной обучающей выборке (\tilde{X}, \tilde{U}) , объема \tilde{T} , то при использовании их в БРП (15) вместо неизвестных истинных значений параметров получается ПБРП групповой классификации для рассматриваемой модели, которое может применяться для оценивания (прогнозирования) классов состояний экономической системы в будущие моменты времени для заданного горизонта прогнозирования $h \geq 1$. Для получения начальной классификации исходной выборки и статистического оценивания неизвестных параметров модели может использоваться EM-алгоритм расщепления смесей распределений наблюдений.

В разделе 2.4 приводятся результаты экспериментального исследования эффективности разработанных алгоритмов дискриминантного анализа на тестовых данных, охватывающих различные типы спецификаций моделей.

В главе 3 решается задача 2 по разработке методов построения векторных авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае марковских (модели MS-VARX, MS-MLR) и независимых (модели IS-VARX, IS-MLR) переключений классов состояний.

В разделе 3.1 формулируется задача построения модели IS-VARX и модели IS-MLR, имеющей самостоятельный интерес в режиме самообучения, а также дается общая характеристика предлагаемого подхода.

В разделе 3.2 приводится аналитическое обоснование EM-алгоритмов для моделей IS-VARX и IS-MLR, которое включает выбор и обоснование вида целевой функции на основе функции правдоподобия, а также получение представлений для оценок максимального правдоподобия параметров модели общего вида IS-VARX в виде функций от апостериорных вероятностей классов состояний.

В разделе 3.3 предлагаются EM-алгоритмы для моделей MS-VARX и MS-MLR. В подразделе 3.3.1 формулируется задача построения модели MS-VARX вида (1) в режиме самообучения, которая заключается в совместном оценивании неизвестных параметров модели $\{A_l, B_l, \Sigma_l\}$ ($l \in S(L)$), π, P и вектора состояний $D = (d_1, \dots, d_T)' \in S^T(L)$ по неклассифицированной выборке наблюдений (\bar{X}, \bar{Z}) . Данная задача известна как задача расщепления смесей распределений многомерных авторегрессионных наблюдений в случае скрытой марковской зависимости номеров классов состояний. В подразделе 3.3.2 для модели MS-VARX предлагается EM-алгоритм, основанный на процедуре Баума – Уэлча (*Baum – Welch procedure*

for Hidden Markov Models)⁹ и приводится его общая схема. Получены представления для оценок всех параметров $\{\Pi_l = (A_{l,1}, \dots, A_{l,p}, B_l), \Sigma_l\}, \pi, P$ модели MS-VARX в регрессионной форме (12).

Используются обозначения: $\theta_l \in \mathfrak{R}^m$ ($m = N \times (pN + M) + N(N + 1) / 2$) – составной вектор параметров модели VARX для класса состояний $l \in S(L)$, образованный из независимых элементов матриц $\{\Pi_l, \Sigma_l\} (l \in S(L))$; $\phi \in \mathfrak{R}^q$ ($q = Lm + (L - 1)(L + 1)$) – вектор параметров смеси распределений, включая параметры VARX-моделей $\{\theta_l\}$ и параметры ОЦМ π, P ; $D = (d_1, \dots, d_T)' \in S^T(L)$ – вектор состояний сложной системы для рассматриваемого периода наблюдения, где $\{d_t\}$ – ОЦМ с параметрами π, P .

В соответствии с общим подходом оценка вектора параметров ϕ максимизирует функцию $\Lambda(\phi, \tilde{\phi})$, представляющую собой условное математическое ожидание логарифмической функции правдоподобия $l(\phi; \bar{X}, \bar{U}, D) = \ln L(\phi; \bar{X}, \bar{U}, D)$ по распределению $\mathbf{P}\{D | \bar{X}, \bar{U}; \tilde{\phi}\}$ случайного вектора D для фиксированной выборки (\bar{X}, \bar{U}) и некоторого заданного (начального) значения вектора параметров $\tilde{\phi}$, которая представима в виде [30]:

$$\begin{aligned} \Lambda(\phi, \tilde{\phi}) &= \mathbf{E}_{\tilde{\phi}}\{l(\phi; \bar{X}, \bar{U}, D) | \bar{X}, \bar{U}; \tilde{\phi}\} = \\ &= \sum_{l \in S(L)} \ln \pi_l \tilde{\gamma}_{l,1} + \sum_{t=2}^T \sum_{k \in S(L)} \sum_{l \in S(L)} \tilde{\xi}_{kl,t} \ln p_{kl} + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in S(L)} \tilde{\gamma}_{l,t} \ln p_X(x_t; u_t, \tilde{\theta}_l), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\tilde{\gamma}_{l,t} = \mathbf{P}\{d_t = l | \bar{X}, \bar{U}; \tilde{\phi}\}$ – апостериорная вероятность класса состояния $l \in S(L)$ в момент t ($t = 1, \dots, T$) для выборки (\bar{X}, \bar{U}) и фиксированного вектора параметров $\tilde{\phi}$; $\tilde{\xi}_{kl,t} = \mathbf{P}\{d_{t+1} = l | d_t = k; \bar{X}, \bar{U}; \tilde{\phi}\}$ – апостериорная вероятность перехода системы из состояния $k \in S(L)$ в состояние $l \in S(L)$ в момент времени t ($t = 1, \dots, T - 1$).

Представления для оценок максимального правдоподобия параметров модели определяются следующей теоремой.

Теорема 3.4. [30, 33] *Если модель MS-VARX в регрессионной форме (4) удовлетворяет предположениям М.1-М.3, П1, то оценки ее параметров по выборке наблюдений (\bar{X}, \bar{U}) , доставляющие максимум функции $\Lambda(\phi, \tilde{\phi})$ вида (16) при фиксированных значениях апостериорных вероятностей $\{\tilde{\gamma}_{l,t}\}, \{\tilde{\xi}_{kl,t}\}$, допускают следующие представления:*

$$\hat{\Pi}_l = \sum_{t=1}^T \tilde{\gamma}_{l,t} x_t u_t' \left(\sum_{t=1}^T \tilde{\gamma}_{l,t} u_t u_t' \right)^{-1}, \quad \hat{\Sigma}_l = \sum_{t=1}^T \tilde{\gamma}_{l,t} (x_t - \hat{\Pi}_l u_t)(x_t - \hat{\Pi}_l u_t)' \left(\sum_{t=1}^T \tilde{\gamma}_{l,t} \right)^{-1}, \quad (17)$$

⁹ Bilmes, J.A. A Gentle Tutorial of the EM Algorithm and its Application to Parameter Estimation for Gaussian Mixture and Hidden Markov Models / J. A. Bilmes. – Berkeley: Int. Comp. Science Institute, 1998.

$$\hat{\pi}_l = \tilde{\gamma}_{l,1}, \quad \hat{p}_{kl} = \sum_{t=2}^T \tilde{\xi}_{kl,t} \left(\sum_{t=2}^T \tilde{\gamma}_{k,t-1} \right)^{-1}, \quad k, l \in S(L). \quad (18)$$

где для апостериорных вероятностей $\tilde{\gamma}_{l,t} = \mathbf{P}\{d_t = l \mid \bar{X}, \bar{U}; \tilde{\theta}\}$, $\tilde{\xi}_{kl,t} = \mathbf{P}\{d_t = l \mid d_{t-1} = k\}$ получены представления в явном виде.

С учетом известной блочной структуры матриц $\Pi_\alpha = (A_{\alpha,1}, \dots, A_{\alpha,p}, B_\alpha)$ ($\alpha \in S(L)$) модели (4) по найденным оценкам $\{\hat{\Pi}_\alpha\}$ однозначно восстанавливаются оценки матриц параметров $\{\hat{A}_{\alpha,1}, \dots, \hat{A}_{\alpha,p}, \hat{B}_\alpha\}$ модели MS-VARX.

В подразделе 3.3.3 описывается алгоритм EM MS-VARX и его частный случай для модели MS-MLR. В подразделе 3.3.4 приводятся результаты экспериментального исследования эффективности разработанных EM-алгоритмов на тестовых данных, охватывающих различные типы спецификаций модели структурных изменений.

В разделе 3.4 предлагается метод сглаживания последовательности номеров классов состояний $\hat{D} = (\hat{d}_1, \dots, \hat{d}_T)' \in S^T(L)$, полученной с помощью предлагаемых алгоритмов статистической классификации многомерных регрессионных и авторегрессионных наблюдений. Целью сглаживания является исключение «ложных сигналов» о смене классов состояний, которые не должны приниматься во внимание при определении моментов переключения состояний (поворотных точек) $1 < \hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_s < T$ ($s \geq 1$) бизнес-цикла.

В подразделах 3.4.1, 3.4.2 дается описание предлагаемого метода и формулируется статистический критерий значимости оценок моментов переключения состояний. Проверяется гипотеза об отсутствии структурного изменения в модели IS(2)-VARX(p, M) временного ряда $y_t = (x_t', z_t')' \subseteq \mathfrak{R}^{N+M}$, приводящего к смене класса состояния в тестируемой серии наблюдений $D_j = (d_{(j-1)m+1}, \dots, d_{jm})' \in \mathfrak{R}^m$ ($j = 1, \dots, \gamma$, $\gamma = T/m$, $p+1 < m \ll T$, полученной с помощью решающего правила классификации $\hat{d}_t \equiv \hat{d}(x_t, z_t)$, $t = 1, \dots, T$. В предположении, что Ω_l ($l \in \{0, 1\}$) – текущее состояние процесса для заданного уровня значимости α_0 ($0 < \alpha_0 \ll 1$), проверяется гипотеза H_0 при альтернативе H_1 [1, 31]:

$$H_0 : r^{(l)} = r_0^{(l)}, \text{ сохраняется текущий класс состояния } \Omega_l; \quad (19)$$

$$H_1 : r^{(l)} = r_1^{(l)} > r_0^{(l)}, \text{ имеет место альтернативный класс } \Omega_{1-l},$$

где $r_0^{(l)}$ – ожидаемое значение условной вероятности ошибки, а $r_1^{(l)}$ ($r_1^{(l)} > r_0^{(l)}$) – пороговое недопустимо большое значение условной вероятности ошибки решающего правила $\hat{d}_t \equiv \hat{d}(x_t, z_t)$ для класса Ω_l , $l = \{0, 1\}$.

Статистический критерий для задачи (19) определяется следующей теоремой.

Теорема 3.6. [31] Если тестируемый временной ряд $y_t = (x_t', z_t')' \in \mathfrak{X} \times \mathfrak{Z} \subseteq \mathfrak{R}^n$ ($t = 1, \dots, T$) описывается моделью (1), М.1-М.4, П.2, то статистический критерий проверки гипотез H_0, H_1 вида (19) на уровне значимости α_0 формулируется следующим образом:

$$\text{гипотеза } H_0 \begin{cases} \text{не отклоняется, если } k_j^{(l)}(m) < B(r_0^{(l)}, m, 1 - \alpha_0); \\ \text{отклоняется, если } k_j^{(l)}(m) \geq B(r_0^{(l)}, m, 1 - \alpha_0), \end{cases} \quad (20)$$

где $k_j^{(l)}(m) \in \{0, 1, \dots, m\}$ – число ошибок в пользу альтернативного класса Ω_{1-l} в серии наблюдений D_j ($j=1, \dots, \gamma$), $B(r_0^{(l)}, m, 1 - \alpha_0)$ – квантиль уровня $1 - \alpha_0$ биномиального закона распределения с параметрами $m, r_0^{(l)}$.

В рамках аппроксимации биномиального распределения нормальным законом для заданных значений вероятностей ошибок первого и второго рода α_0, β_0 и порогового значения $r_1^{(l)}$ критерия (20) получена формула для расчета длины серии m . В подразделе 3.4.3 описан алгоритм выбора значений управляемых параметров предлагаемого метода в режиме машинного обучения, а в подразделе 3.4.4 – численные результаты исследования разработанного алгоритма для тестовых моделей.

В главе 4 решается Задача 3 по разработке методов построения модели динамической многомерной линейной регрессии с независимыми переключениями состояний IS-MLR-VAR, предназначенной для оценивания текущего и прогнозирования будущего состояния экономической активности в режиме обучения.

В разделе 4.1 для модели IS-MLR-VAR вида (б) получено представление в форме модели IS-VARX [1, 13]:

$$x_t = A_\alpha X_{t-1} + C_\alpha Z_{t-1} + B_\alpha z_t + \eta_{\alpha,t} = A_\alpha X_{t-1} + D_\alpha Z_t + \eta_{\alpha,t}, \quad \alpha \in S(L), t = 1, \dots, T, \quad (21)$$

$$C_{\alpha,l} = -A_{\alpha,l} B_\alpha, \quad l = 1, \dots, p, \quad \alpha \in S(L), \quad (22)$$

где $X_{t-1} = (x'_{t-1}, \dots, x'_{t-p})' \in \mathfrak{R}^{Np}$, $Z_{t-1} = (z'_{t-1}, \dots, z'_{t-p})' \in \mathfrak{Z}^{Mp}$ – векторы лаговых эндогенных и экзогенных переменных, $X_0 = (x_{1-p}, \dots, x_0)' \in \mathfrak{X}^p$, $Z_0 = (z_{1-p}, \dots, z_0)' \in \mathfrak{Z}^p$ – векторы начальных значений временных рядов; $Z_t = (z'_t, Z'_{t-1})' = (z'_t, z'_{t-1}, \dots, z'_{t-p}) \in \mathfrak{Z}^{p+1} \subseteq \mathfrak{R}^{M(p+1)}$ – вектор экзогенных переменных; $B_\alpha, A_\alpha = (A_{\alpha,1}, \dots, A_{\alpha,p})$, $C_\alpha = (C_{\alpha,1}, \dots, C_{\alpha,p})$ и $D_\alpha = (B_\alpha, C_\alpha)$ – блочные матрицы размерности $N \times Np$, $N \times Mp$ и $N \times M(p+1)$.

Для модели IS-VARX в форме (21), (22) формулируются задачи оценивания параметров модели и класса состояния экономического процесса.

1. Задача групповой классификации, то есть оценивание номера класса состояния $d \in S(L) = \{0, 1, \dots, L-1\}$ по заданной серии наблюдений (\bar{X}, \bar{Z}) ($\bar{X} = (x_t) \in \mathfrak{X}^T$, $\bar{Z} = (z_t) \in \mathfrak{Z}^T$) в предположении:

$$\text{П.2.1. } \mathbf{P}\{d = \alpha\} = \pi_\alpha > 0 (\alpha \in S(L)), \quad \sum_{\alpha \in S(L)} \pi_\alpha = 1. \quad d \in S(L) = \{0, 1, \dots, L-1\} \quad (23)$$

2. Задача поточечной классификации, то есть оценивание номера класса состояния $d \in S(L) = \{0, 1, \dots, L-1\}$ по наблюдению (x_t, z_t) в момент времени t ($t = 1, \dots, T$) в предположении:

$$\text{П.2.2. } P\{d_t = \alpha\} = \pi_\alpha > 0 (\alpha \in S(L)), \quad \sum_{\alpha \in S(L)} \pi_\alpha = 1. \quad (24)$$

3. Задача оценивания параметров $\{A_{\alpha,l}\}, B_\alpha, \Sigma_\alpha$ ($l = 1, \dots, p$) для классов состояний $\alpha \in S(L)$ по классифицированной обучающей выборке наблюдений

$(\tilde{X}, \tilde{Z}) = \bigcup_{\alpha \in S(L)} (\tilde{X}_\alpha, \tilde{Z}_\alpha)$, где $\tilde{X}_\alpha \in \mathfrak{X}^{\tilde{T}_\alpha}$, $\tilde{Z}_\alpha \in \mathfrak{Z}^{\tilde{T}_\alpha}$. объема $\tilde{T} = \sum_{\alpha \in S(L)} \tilde{T}_\alpha$.

В разделе 4.2 разработаны алгоритмы ДА, реализующие оптимальные решающие правила групповой и поточечной классификации для оценивания класса состояния экономического процесса по одиночным и групповым наблюдениям. Отдельно рассматривается актуальный для практики случай двух классов состояний.

Теорема 4.1. [1,13] *Если истинные значения параметров $\{A_{\alpha,l}\}$, $\{B_\alpha, \Sigma_\alpha, \pi_\alpha\}$ ($l=1, \dots, p$, $\alpha \in S(L)$) известны и для модели IS-MLR-VAR вида (21) (22) выполняются предположения М.1–М.4, то для заданных начальных значений $x_{1-p}, \dots, x_0 \in \mathfrak{X}$, $z_{1-p}, \dots, z_0 \in \mathfrak{Z}$ справедливы утверждения:*

1) *при условии П.2.1 БРП $d_0(\bar{x}; \bar{z})$ групповой классификации серии наблюдений (\bar{x}, \bar{z}) длительностью T определяется формулой:*

$$d_0(\bar{x}, \bar{z}) = \arg \min_{\alpha \in S(L)} \left\{ \text{tr}(\Sigma_\alpha^{-1} S_\alpha) + \ln |\Sigma_\alpha| - \frac{2 \ln \pi_\alpha}{T} \right\}, \quad (25)$$

$$S_\alpha = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \eta_{\alpha,t} \eta_{\alpha,t}', \quad \eta_{\alpha,t} = x_t - A_{d(t)} X_{t-1} - D_{d(t)} Z_t, \quad t=1, \dots, T; \quad (26)$$

2) *при условии П.2.1 БРП $d_0(x_t, z_t)$ поточечной классификации наблюдения (x_t, z_t) в момент времени t имеет вид (25), где вместо S_α используется*

$$S_{\alpha,t} = \eta_{\alpha,t} \eta_{\alpha,t}', \quad \eta_{\alpha,t} = x_t - A_{d(t)} X_{t-1} - D_{d(t)} Z_t, \quad t=1, \dots, T. \quad (27)$$

Следствие 4.2. [1,13] *Подстановочные решающие правила групповой и поточечной классификации для рассматриваемой модели наблюдений получаются из соответствующих БРП подстановкой в них статистических оценок $\{\hat{A}_{\alpha,l}\}$, $\{\hat{B}_\alpha\}$, $\{\hat{\pi}_\alpha\}$ ($l=1, \dots, p$) неизвестных параметров модели.*

В разделе 4.3 получены аналитические формулы для вычисления оценок максимального правдоподобия (ММП-оценок) параметров моделей MLR-VAR для различных классов состояний по классифицированной выборке.

Теорема 4.3. [1,13] *Если модель (22) для фиксированного класса состояний удовлетворяет предположениям М.1-М.4, $x_0 \in \mathfrak{X}$, $z_0 \in \mathfrak{Z}$ – заданные начальные значения, то ММП-оценки \hat{A} , \hat{D} , $\hat{\Sigma}$ параметров модели по выборке (\tilde{X}, \tilde{Z}) объема $T > \max\{2M, N\}$ определены единственным образом и допускают представления в аналитическом виде.*

Теорема 4.4. [1, 13]. *В условиях теоремы 4.1 ММП-оценки $\hat{A}, \hat{D}, \hat{\Sigma}$ при $T \rightarrow \infty$ сходятся по вероятности к истинным значениям параметров A, D, Σ , а подстановочные решающие правила, определяемые в Следствии 4.2, являются состоятельными: их вероятности ошибок сходятся к минимально возможным вероятностям ошибок соответствующих БРП.*

В разделе 4.4 предлагаются итерационные алгоритмы вычисления обобщенных МНК-оценок параметров модели MLR(N, M)-VAR(p), $p \geq 1$, $N > 1$, $M \geq 1$.

В разделе 4.5 в результате численных экспериментов на тестовых данных установлено, что при высокой степени корреляции ошибок наблюдений и, соответственно, зависимости регрессионных наблюдений предлагаемые алгоритмы имеют существенный выигрыш по сравнению с обычным МНК, который рассматривался как альтернативный метод оценивания параметров для модели MLR-VAR.

В главе 5 решается задача 4 по разработке методов построения многомерной непараметрической модели регрессии с независимыми переключениями состояний IS-MNLR в режиме обучения, предназначенной для классификации состояний экономических процессов и прогнозирования эндогенных переменных на основе многомерных нелинейных моделей с функциональной неоднородностью.

В разделе 5.1 дается общая характеристика модели IS-MNPR с функциональной неоднородностью, обусловленной существованием априорно предполагаемых классов состояний $\{\Omega_l\}$, вид которой описывается соотношениями [1]:

$$\begin{aligned} x_t &= f_l(z_t) + \xi_t, \quad x_t \in \mathfrak{R}^N, \quad z_t \in \mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}^M, \quad t = 1, \dots, T, \quad l \in S(L), \\ f_k(z) &\neq f_l(z) \quad \forall z \in \mathfrak{Z}, \quad k \neq l, \quad k, l \in S(L), \end{aligned} \quad (28)$$

где $f_l(\cdot)$ ($l \in S(L)$) – неизвестные нелинейные функции, определяющие функциональный вид эндогенно-экзогенной структуры модели.

В соответствии с (28) условная плотность распределения составного вектора наблюдений $y \in \mathfrak{Y} \subset \mathfrak{R}^N \times \mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}^n$ имеет вид:

$$p_l(y) = p_\xi(x - f_l(z_t)) p_z(z), \quad p_\xi(z) = \varphi_{0_N, \Sigma}(z), \quad z \in \mathfrak{R}^N, \quad (29)$$

где $p_z(z)$ ($z \in \mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}^M$) – плотность распределения случайного вектора экзогенных переменных; $\xi_t = (\xi_{ti}) \in \mathfrak{R}^N$ ($t = 1, \dots, T$) – независимые случайные векторы ошибок наблюдений с нормальным распределением и ковариационной матрицей $\Sigma \in \mathfrak{S}_N$, удовлетворяющей условию «малости дисперсий»:

$$\text{tr}(\Sigma) \rightarrow 0 \quad \text{или} \quad \sigma^2 \equiv \max_{i=1, \dots, N} \{\sigma_i^2\} \rightarrow 0, \quad \sigma_i^2 = \mathbf{D}\{\xi_{ti}\} \quad (i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T), \quad (30)$$

при котором распределения вероятностей наблюдений $y_t \in \mathfrak{R}^n$ ($t = 1, \dots, T$) близки к вырожденному и концентрируются вблизи нелинейных «регрессионных» гиперповерхностей (при $n = 2$ – линий регрессии) в пространстве наблюдения \mathfrak{R}^n . Номера классов состояний являются взаимно независимыми случайными величинами $d_t = d(y_t) \in S(L)$ ($t = 1, \dots, T$) с априорными вероятностями классов $\pi_l > 0$, $l \in S(2)$,

$\sum_{l \in S(L)} \pi_l = 1$. Решаются следующие вспомогательные подзадачи [1, 18, 23]:

Задача 4.1. Непараметрическое оценивание многомерной плотности $p_l(y)$ ($y \in \mathfrak{R}^n$) распределения, близкого к вырожденному;

Задача 4.2. Оценивание класса состояния процесса $d_t \in S(L)$ по заданному значению вектора наблюдений $y_t \in \mathfrak{R}^n$;

Задача 4.3. Оценивание (прогнозирование) эндогенных переменных $x_t \in \mathfrak{R}^N$ по заданным значениям вектора экзогенных переменных $z_t \in \mathfrak{R}^M$ в случае, когда известен класс состояния $d_t \in S(L)$ и эндогенно-экзогенная структура вектора наблюдений $y_t = (x_t', z_t')' \in \mathfrak{R}^n$, $t = 1, \dots, T$.

В разделе 5.2 для решения задачи 4.1 предлагается оценка многомерной плотности с адаптивным гауссовским ядром [1]:

$$\hat{p}(y) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \phi_{y_t, h_t^2 H_{(t, m(t))}}(y), \quad (31)$$

где $O(t, m_t(T))$ – локальная окрестность точки y_t радиуса $m_t(T)$, обеспечивающая наилучшую в смысле V -статистики¹⁰ линейную аппроксимацию нелинейной зависимости (28) в локальной окрестности точки y_t ($t = 1, \dots, T$); $\bar{y}^{(t, m(t))}$, $H_{(t, m(t))}$ – выборочное среднее значение и выборочная оценка ковариационной матрицы вектора наблюдений в локальной окрестности точки y_t , K_0 – заданная константа, определяющая минимально допустимый размер локальной окрестности; коэффициенты сглаживания $h_t \equiv h(m(t))$ удовлетворяют условиям асимптотической несмещенности и состоятельности:

$$h(m(t)) \rightarrow 0, m(t)h^n(m(t)) \rightarrow \infty, m(t) \rightarrow \infty, T \rightarrow \infty. \quad (32)$$

Получены результаты асимптотического анализа смещения, вариации и количественных мер точности оценок, указывающие на преимущество данной оценки по сравнению с традиционно используемой оценкой с фиксированным ядром [18].

В разделе 5.3 приводятся результаты решения задачи 4.2. В условиях (32) предлагаются оптимальные в смысле минимума риска байесовское и подстановочное байесовское решающие правила (ПБРП) дискриминантного анализа модели IS-MNPR. Алгоритм оценивания (прогнозирования) класса состояния реализует ПБРП классификации [1, 23]:

$$d_T(y) = \arg \max_{l \in S(L)} \{\hat{\pi}_l \hat{p}_l(y)\}, y \in \mathfrak{Y} \subset \mathfrak{R}^n, \quad (33)$$

в котором используются непараметрические оценки $\{\hat{p}_l(y)\} (l \in S(L))$ вида (31). Отдельно рассматривается случай двух классов.

На основании асимптотического анализа риска (средних потерь) решающих правил классификации в случае оценок плотности с фиксированным ядром и предлагаемым адаптивным ядром в асимптотиках (30) и (32) показано [18], что предлагаемое решающее правило имеет меньший риск в условиях малого объема наблюдений и усиливающейся зависимости компонент вектора $y = (y_i) \in \mathfrak{R}^n$.

В разделе 5.4 для решения задачи 4.3 предлагается алгоритм непараметрического регрессионного прогнозирования эндогенных переменных, который основан на оценке моды условного распределения эндогенных переменных [1, 23]:

$$\hat{x}_l = \arg \max_{x \in \mathfrak{R}^N} \hat{p}_l(x | z_l) = \arg \max_{x \in \mathfrak{R}^N} \frac{\hat{p}_l(x, z_l)}{\hat{p}_l(z_l)}, l \in S(L), \quad (34)$$

где $\hat{p}_l(x, z)$ – оценка совместной плотности распределения случайных векторов x, z с адаптивным ядром вида (31), $\hat{p}_l(z_l)$ – оценка плотности распределения $p(z_l)$.

¹⁰ Anderson, T.W. An introduction to multivariate statistical analysis. 3rd Edition / T.W. Anderson, N.Y.: Wiley, 2003. – 747 p.

В разделе 5.5 приводятся результаты экспериментального исследования эффективности предлагаемых алгоритмов. Показывается, что алгоритмы, основанные на непараметрической оценке плотности с адаптивным ядром (32)-(34), имеют более высокую точность по сравнению с алгоритмами, использующими оценки плотности с фиксированным ядром при оценивании (прогнозировании) класса состояния экономического процесса и эндогенных переменных в условиях малого объема наблюдений и с увеличением степени статистической зависимости используемых переменных.

В главе 6 решается задача 5 по разработке методики построения и применения эконометрических моделей с марковскими переключениями состояний и опережающими статистическими индикаторами по опросным панельным данным для оценивания поворотных точек цикла экономической активности и прогнозирования темпов роста белорусской экономики.

В разделе 6.1 дается характеристика разработанных многомерных эконометрических моделей, инструментальных средств анализа и прогнозирования белорусской экономики, формирования денежно-кредитной политики до 2008 года [2–4, 6–10, 16, 17, 24, 45, 46, 48, 54, 55, 58, 62, 63, 61, 76], а также используемых методов учета структурных изменений и разработанных алгоритмов коррекции прогнозов в случае структурных изменений в прогнозном периоде [5, 12, 50, 60].

В разделе 6.2 обосновывается актуальность моделей с марковскими переключениями состояний в условиях циклических изменений экономической активности в контексте проведения контрциклической экономической политики. На основе анализа международного опыта обосновывается актуальность использования микроданных и методов машинного обучения в задачах формирования монетарной политики¹¹. Определяются требования к модельному инструментарию в рассматриваемых условиях и отмечаются прогностические способности эконометрических моделей с опережающими индикаторами, основанных на концепциях «кобрейкинга», «коинтеграции» и «переключения состояний».

В разделе 6.3 дается общая характеристика и сравнительный анализ используемых в работе методов идентификации циклов экономической активности, включая фильтр Ходрика – Прескотта и модели с марковскими переключениями состояний.

В разделе 6.4 предлагается оптимизированная в работе методика ОСЭР¹² построения статистических индикаторов по опросным данным, включая: индекс экономических настроений (ИЭН) для экономики в целом и индексы доверия для видов экономической деятельности (ВД). Устанавливается опережающий характер цикла рассчитываемого ИЭН по отношению к циклам реального ВВП и его годовым темпам роста [35, 39].

Раздел 6.5 содержит результаты тестирования множественных структурных изменений, интегрированности и коинтегрированности временных рядов для годовых темпов роста реального ВВП и ИЭН [39].

¹¹ Hendry, D.F. The future of macroeconomics: macro theory and models at the Bank of England / D.F. Hendry, J.N.J. Muellbauer // Oxford Review of Economic Policy, Oxford University Press. – 2018. – Vol. 34(1–2). – P. 287–328.

¹² Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. – OECD, 2008. – Mode of access: <https://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>.

В разделе 6.6 формулируется разработанная методика построения моделей с марковскими переключениями состояний для годовых темпов роста реального ВВП Республики Беларусь, включающих опережающий индикатор в виде сезонно скорректированного индекса ИЭН. В подразделе 6.6.1 дается общая характеристика методики, структурная схема которой приводится на рисунке 1.

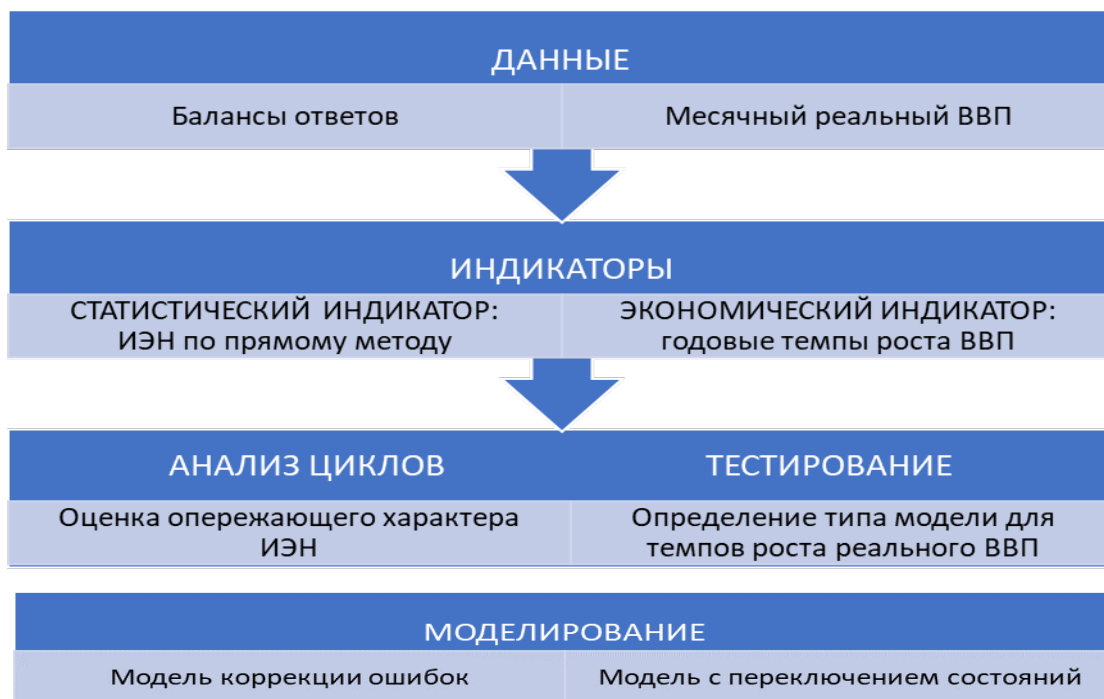


Рисунок 1. – Структурная схема методики построения и применения эконометрических моделей на основе опережающих индикаторов по микроданным

В подразделах 6.6.2-6.6.4 предлагаются возможные варианты спецификации одномерных моделей с переключением состояний на основе регрессионного коинтеграционного уравнения, формулируется правило максимума апостериорной вероятности классов для классификации состояний и правило датировки поворотных точек цикла для двух классов состояний: класс 0 – «спад» (включает фазы цикла «замедление и рецессия») и класс 1 – «рост» (включает фазы «восстановление» и «расширение»).

Рассматриваются следующие базовые модели [43, 44]:

MS-LR (*MS-Linear Regression*):

$$GGDP_t = c_{d(t)} + \beta_{d(t),1}t + \beta_{d(t),2}ESI_t + \xi_t;$$

MS-LR-AR (*MS-Linear Regression with Autocorrelation Residuals*):

$$GGDP_t = c_{d(t)} + \beta_{d(t),1}t + \beta_{d(t),2}ESI_t + \alpha_1 GGDP_{t-1} + \alpha_2 GGDP_{t-2} + \eta_t,$$

MS-CARX (*MS-Cointegrated autoregressive model with exogenous variables*):

$$GGDP_t = c_{d(t)} + \alpha_{d(t),1}GGDP_{t-1} + \alpha_{d(t),2}GGDP_{t-2} + \beta_{d(t),1}t + \beta_{d(t),2}ESI_t + \eta_t.$$

где ξ_t, η_t ($t = 1, \dots, T$) – стационарный процесс и процесс гауссовского белого шума; последовательность номеров классов состояний $d_t \in \{0, 1\}$ ($t = 1, \dots, T$) является однородной цепью Маркова с начальными вероятностями классов состояний π_0, π_1 и матрицей переходных вероятностей $P = (p_{kl})$:

$$\pi_0 = \mathbf{P}\{d_1 = 0\} > 0, \quad \pi_1 = 1 - \pi_0,$$

$$p_{kl} = \mathbf{P}\{d_{t+1} = l \mid d_t = k\} \geq 0 \quad (k, l \in \{0, 1\}), \quad p_{00} + p_{01} = 1, \quad p_{10} + p_{11} = 1.$$

Все модели описывают зависимость между $GGDP_t$ и индексом ESI, который может использоваться в форме опережающего индикатора ESI_t и «совпадающего» индикатора. Период опережения для индекса ESI устанавливается с учетом оптимальных статистических характеристик модели.

В разделе 6.7 приводятся результаты построения и применения моделей в задачах периодизации цикла и прогнозирования экономической активности [43, 44]. Подразделы 6.7.1 и 6.7.2 содержат результаты тестирования временных рядов, статистического оценивания параметров моделей, а также графического анализа результатов периодизации цикла и прогнозирования экономической активности для рассматриваемых моделей, которые демонстрируют преимущества модели MS-LR при решении обеих задач на более широком множестве моделей MS-ARX, допускающих полные или частичные структурные изменения параметров.

На рисунке 2 приводится временной ряд темпов роста реального ВВП (переменная $GGDP$, черная линия), его цикл ($GGDP_{cn}$, зеленая линия), построенный с помощью фильтра Ходрика – Прескотта, а также прогнозы для обоих классов состояний и периодизации цикла на основе модели MS-LR: серые вертикальные полосы соответствуют классу 0 (спад).

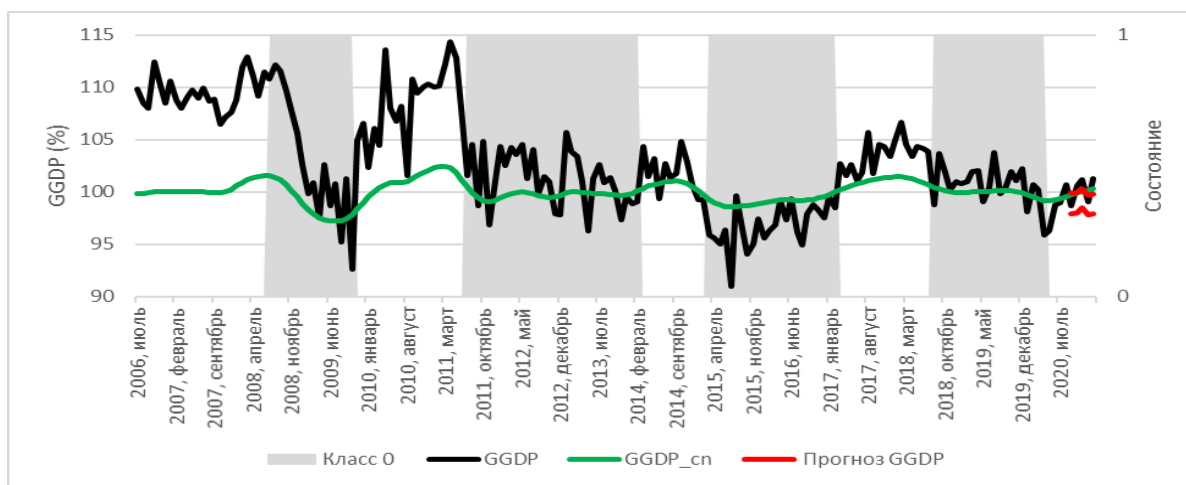


Рисунок 2. – Темпы роста реального ВВП, его цикл, а также прогнозы и периодизация классов состояний экономической активности на основе модели MS-LR

Таблица 1 включает поворотные точки («пик» и «дно») циклов реального ВВП, его годовых темпов роста и ИЭН на основе фильтра Ходрика – Прескотта, а также моменты смены классов состояний на основе модели MS-LR. В круглых скобках для ESI указаны временные лаги, указывающие в целом на опережающий характер ESI по отношению к GGDP. Отсутствие опережающего характера ИЭН в отдельные годы объясняется высокой неопределенностью рыночной конъюнктуры в данные периоды времени.

Таблица 1. – Поворотные точки цикла экономической активности

Цикл	Поворотные точки							
	Пик	Дно	Пик	Дно	Пик	Дно	Пик	Дно
<i>GDP_cn</i>	07.2008	10.2009	03.2011	09.2013	07.2014	08.2016	06.2018	06.2020
<i>GGDP_cn</i>	03.2008	07.2009	03.2011	11.2013	10.2014	07.2015	01.2018	05.2020
<i>ESI_cn</i>	02.2008 (-1)	03.2009(-4)	12.2010(-3)	12.2013(1)	05.2014(-5)	03.2015(-4)	01.2018(0)	05.2020(0)
<i>Модель MS-LR</i>	06.2008	10.2009	06.2011	02.2014	02.2015	02.2017	07.2018	04.2020

Подраздел 6.7.3 включает результаты сравнительного анализа точности прогнозов для различных моделей, основанных на принципах коинтеграции и кобрейкинга временных рядов GGDP и ESI, учитывающих (модель MS-LR) и не учитывающих механизм переключения классов состояний, включая модели [44]:

- модель CLR (*Cointegrated Linear Regression*»), оцененная с помощью метода DOLS (*Dynamic Ordinary Least Squares*)¹³;
- модель LSRB (*Least Squares Regression with Breaks*), оцененная с помощью метода Break LS¹⁴.

Показатели точности ретроспективных прогнозов и прогнозов для будущих моментов времени годовых темпов роста реального ВВП для трех моделей представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели точности прогнозов годовых темпов роста реального ВВП

Ретроспективные прогнозы прогнозный период: июнь–август 2020 г.					
Модели	Число наблюдений	RMSE	MAE	MAPE, %	Theil
MS-LR	172	3.028	2.422	2.361	0.0147
CLR	172	2.857	2.192	2.148	0.0138
LSRB	172	2.263	1.730	1.693	0.0109
Прогнозы на 5 месяцев прогнозный период: сентябрь 2020 г.– январь 2021 г.					
MS-LR	5	1.155	1.046	1.041	0.0058
CLR	5	2.879	2.712	2.697	0.0146
LSRB	5	2.095	1.790	1.774	0.0105

Полученные результаты демонстрируют тот факт, что модели с переключением состояний могут иметь существенное преимущество по точности прогнозов для будущих моментов времени по сравнению с близкими по спецификации моделями, не учитывающими цикличность изменений экономической активности. Кроме того, они позволяют получать периодизацию цикла, имеющую содержательную экономическую интерпретацию. Модель MS-LR реализована в пакете EViews и является частным случаем многомерной модели MS-MLR. Для построения моделей MS-MLR и MS-VARX в диссертационной работе разработаны EM-алгоритмы (глава 3)

¹³ Stock, J. A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems / J. Stock, M. Watson // *Econometrica*. 1993. – №61(4). – P. 783–82.

¹⁴ Bai, J. Estimating and Testing Linear Model with Multiple Structural Changes / J. Bai, P. Perron // *Econometrica*. – 1998. – Vol.66. – P. 47–78.

и алгоритмы дискриминантного анализа с марковскими и независимыми переключениями состояний (глава 2).

В главе 7 решается задача 6 по разработке методики статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микро- и макроуровне по неоднородным панельным данным финансовой отчетности организаций и заданным критериям риска дефолта в режиме обучения и самообучения [36, 38, 39, 40, 44].

В разделе 7.1 на основе опыта центральных банков обосновывается актуальность использования микроданных в виде финансовой отчетности организаций для анализа финансовой стабильности белорусской экономики. В условиях отсутствия репрезентативной выборки по дефолтам и общепринятых кредитных рейтингов белорусских предприятий для построения статистических показателей кредитоспособности и финансовой стабильности предлагается подход, основанный на использовании алгоритмов машинного обучения для анализа панельных микроданных в «пространственном представлении» [26].

В разделе 7.2 описываются алгоритмы оптимизации методики построения системы *статистических кредитных рейтингов* (СКР) на микроуровне (уровне организаций) и макроуровне (уровне ВД и реального сектора в целом) [36]. Приводятся результаты применения построенного интегрального кредитного рейтинга белорусской экономики для прогнозирования циклов экономической активности.

В разделе 7.3 формулируются задачи, решаемые на этапе построения системы *статистических показателей финансовой стабильности* (СПФС), и описываются методы их решения на основе финансовой отчетности организаций и заданных *экспертных критериев риска дефолта* (условий уязвимости к дефолту). Экспертный критерий описывается бинарной переменной со значениями: 0, если условия критерия не выполняются и признаков риска дефолта нет; 1 – в противном случае.

В подразделах 7.3.1–7.3.3 описываются способы решения следующих задач: формирование целевой выборки организаций; выбор критериев риска дефолта; построение *интегральных критериев* (экономически или статистически обоснованные комбинации экспертных критериев) и *доминирующего критерия* (интегрального критерия, на который приходится большая доля всех проблемных организаций).

В подразделе 7.3.4 описывается разработанная система СПФС и методы ее построения. Система СПФС включает следующие показатели.

- *на микроуровне*: оценки апостериорных вероятностей риска дефолта организаций; оценки априорных вероятностей риска дефолта организаций из классов кредитоспособности от 1 до 4 для каждого ВД и для реального сектора экономики;
- *на макроуровне*: оценки вероятностей риска дефолта для всех ВД; оценка вероятности дефолта для реального сектора экономики – интегральный показатель финансовой стабильности; доминирующие интегральные критерии риска дефолта, указывающие на основные признаки риска дефолта в конкретный временной интервал; матрицы миграции кредитных рейтингов.

Оценка вероятности риска дефолта по заданному критерию рассчитывается ежеквартально как доля проблемных организаций с признаками дефолта по данному критерию от общего числа организаций в анализируемой выборке.

В разделе 7.4 описывается разработанная методика статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микро- и макроуровне на основе микроданных [36, 40]. В подразделе 7.4.1 дается общая характеристика разработанной методики (рисунок 3) и формулируются решаемые на ее основе задачи.

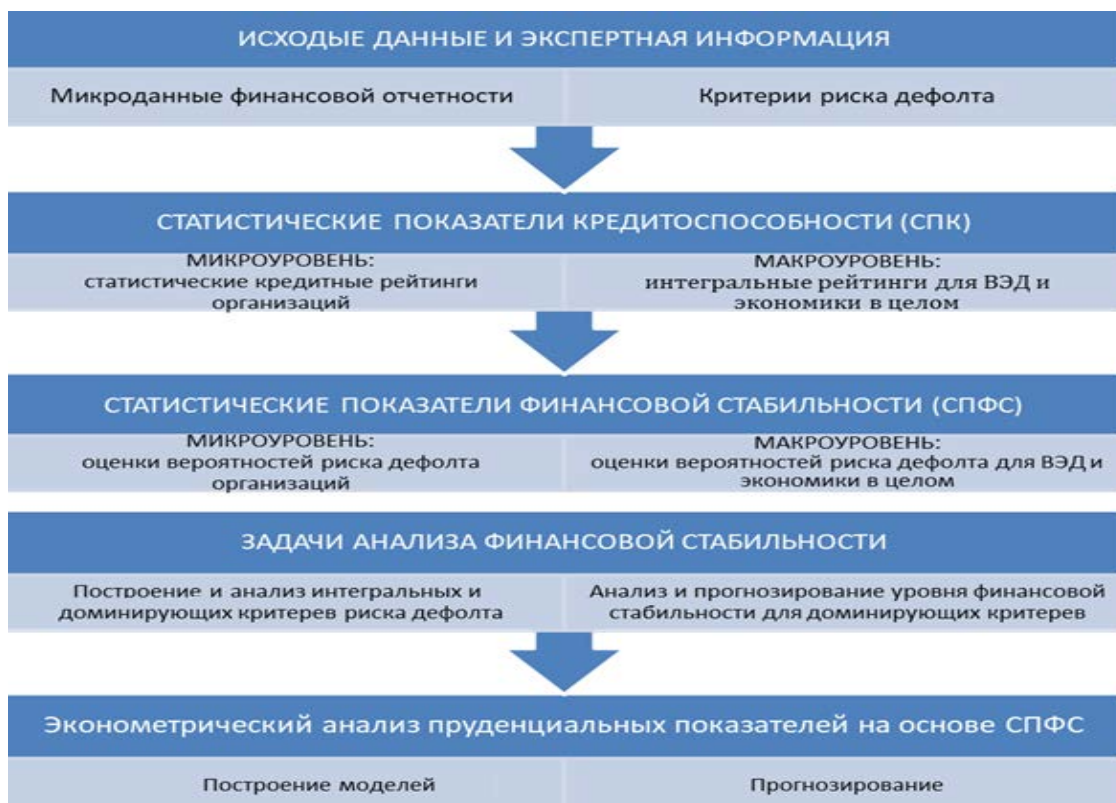


Рисунок 3. – Структурная схема методики статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микро- и макроуровне

В подразделе 7.4.2 установлена тесная взаимосвязь между предлагаемыми статистическими показателями кредитоспособности и финансовой стабильности. Дается сравнительный анализ результатов применения различных интегральных критериев риска дефолта и интегрального кредитного рейтинга ICR для анализа финансовой стабильности реального сектора экономики. В подразделе 7.4.3 исследуется динамика структуры классов кредитоспособности и доли проблемных организаций в классах в условиях роста и снижения экономической активности. На рисунке 4 синие полосы с различной интенсивностью соответствуют долям непроведенных организаций в классах кредитоспособности от класса 1 (самый низкий уровень кредитоспособности) до класса 4 для реального сектора экономики (ось ординат). Желтым цветом отмечена доля проблемных организаций в соответствующем классе. Как видно, для класса 4 с самым высоким уровнем кредитоспособности на всем интервале доля проблемных организаций (вероятность риска дефолта) близка к нулю.

Согласно рисунку 4 наибольшая доля проблемных организаций наблюдается в классах 1 и 2. При этом в 2016 г. имеют место их максимальные значения.

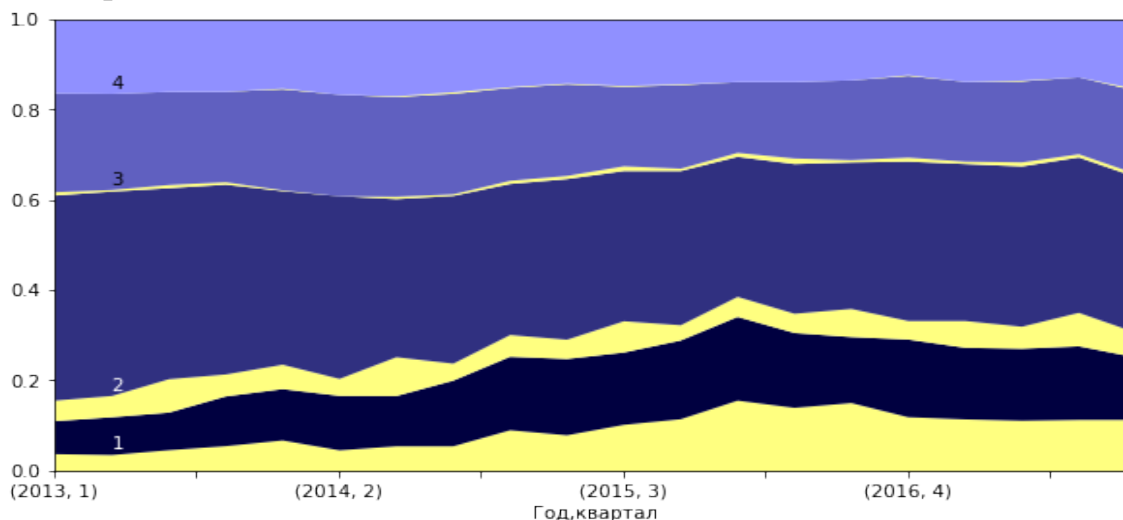


Рисунок 4. – Динамика доли проблемных организаций по доминирующему критерию в классах кредитоспособности 1-4 для экономики в целом, %

В подразделе 7.4.4 проводится исследование механизма формирования системных рисков на основе анализа динамики доминирующих критериев риска дефолта. В подразделе 7.4.5 решается задача прогнозирования уровня финансовой стабильности экономики с использованием оценок матриц миграции кредитных рейтингов [28].

В разделе 7.5 построены эконометрические модели зависимостей пруденциальных показателей устойчивости банковской системы, включая коэффициент достаточности нормативного капитала *car*, долю проблемной задолженности *prl* и годовой прирост требований банков к экономике по отношению к ВВП *cr_gdp_rate*, в которых статистические показатели финансовой стабильности (вероятности риска дефолта по доминирующему критерию и интегральному кредитному рейтингу) имеют опережающий характер. На основе построенных VAR-моделей исследуется опережающий характер указанных статистических показателей и оцениваются их прогностические способности [38, 40, 41].

В Приложении приводятся копии документов, подтверждающих внедрение результатов диссертации, включая: 5 справок об использовании результатов диссертационного исследования в Главном управлении монетарной политики и экономического анализа и Управлении финансовой стабильности Национального банка Республики Беларусь для анализа и прогнозирования денежно-кредитной политики при формировании согласованных социально-экономических и монетарных программ и как дополнительный инструментарий для выработки комплексных мер в области денежно-кредитной, надзорной и экономической политики в целом с целью раннего выявления системных рисков, причин и источников их возникновения; 3 акта об использовании результатов исследований в учебном процессе БГУ и ГрГУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны новые методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний экономических процессов в режиме обучения по классифицированной выборке, предназначенных для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных для различных классов состояний по текущим наблюдениям [1, 25, 30, 33, 58, 66, 72, 80, 86, 105, 106]. Для классификации состояний экономических процессов разработаны алгоритмы дискриминантного анализа многомерных авторегрессионных и регрессионных наблюдений, описываемых моделями с марковскими (MS-VARX, MS-MLR) и независимыми (IS-VARX, IS-MLR) переключениями состояний, предназначенные для оценки текущего класса состояния и прогнозирования экономической активности при регулярном обновлении данных. В основе разработанных алгоритмов лежат оптимальные в смысле минимума вероятности ошибочной классификации решающие правила, вероятность ошибки которых сходится к минимально возможной при увеличении числа наблюдений. Эффективность разработанных алгоритмов дискриминантного анализа доказана на тестовых модельных данных.

2. Разработаны новые методы построения многомерных (векторных) авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и зависимых (марковских) переключений классов состояний, предназначенных для оценивания моментов переключения классов состояний (поворотных точек циклов) и прогнозирования экономической активности в режиме самообучения [1, 15, 30, 31, 33, 87, 88, 90, 92, 95, 99, 100, 105, 108, 109]. Для совместного оценивания параметров моделей и моментов переключения состояний предлагаются алгоритмы машинного обучения семейства EM-алгоритмов (*Expectation-Maximization algorithms*) для моделей с марковскими (MS-VARX, MS-MLR) и независимыми (IS-VARX, IS-MLR) переключениями состояний, основанные на процедуре Баума – Уэлча, для случайных процессов, управляемых скрытой цепью Маркова, которые не требуют задания типа модели циклических изменений и основаны на общей регрессионной форме представления авторегрессионных и регрессионных моделей, что создает возможности для оптимизации эндогенно-экзогенной структуры модели с помощью методов машинного обучения. Разработан новый метод сглаживания «краткосрочных колебаний» экономической активности на основе статистического теста моментов смены состояний. Эффективность разработанных методов доказана на тестовых модельных данных.

3. Разработаны новые методы построения моделей динамической многомерной линейной регрессии с автокоррелированными ошибками в случае независимых переключений состояний, обобщающие известные методы оценивания одномерных динамических моделей линейной регрессии и предназначенные для оценивания класса состояния и прогнозирования эндогенных переменных по текущим одиночным и групповым наблюдениям в режиме обучения [1, 13, 53, 64]. Получены аналитические представления для оценок максимального правдоподобия параметров модели IS-MLR-VAR и доказана их состоятельность. Разработаны итерационные алгоритмы вычисления оценок параметров, обобщающие известные алгоритмы типа Кохрейна – Окартта для одномерных моделей динамической регрессии. Для модели IS-MLR-VAR разработаны алгоритмы дискриминантного анализа, позволяющие оценивать класс состояния экономического процесса по одиночным и групповым наблюдениям. Эффективность разработанных алгоритмов доказана на тестовых модельных данных.

4. Разработаны новые методы построения модели многомерной непараметрической регрессии с независимыми переключениями состояний в режиме обучения, предназначенные для классификации состояний и прогнозирования экономических процессов на основе многомерных нелинейных моделей с функциональной неоднородностью [1, 18, 23, 51, 56, 69, 73, 75]. Для оценивания класса состояния экономического процесса в условиях рассматриваемой модели IS-MNPR разработан алгоритм классификации, использующий предлагаемую непараметрическую ядерную оценку для многомерных условных плотностей распределений. Алгоритм прогнозирования эндогенных переменных основан на ядерной оценке моды условной плотности распределения с адаптивным гауссовским ядром для заданного класса состояния. На тестовых данных проведено экспериментальное исследование эффективности разработанного алгоритма прогнозирования и его сравнение с алгоритмом Надарая – Ватсона¹⁵.

5. Разработана новая методика построения и применения эконометрических моделей с марковскими переключениями состояний и разработанным опережающим статистическим индикатором по опросным панельным данным для оценивания поворотных точек цикла экономической активности и прогнозирования темпов роста белорусской экономики [2–12, 16, 17, 22, 24, 28, 32, 35, 37, 39, 42–48, 50, 52, 54, 55, 57–63, 67, 68, 71, 74, 76, 85, 88, 89, 92, 93, 97–99, 100, 102, 104, 105, 107, 110]. Предлагаемая методика включает построение статистических индикаторов экономической активности по месячным опросным данным, включая: индекс экономических настроений (ИЭН) для экономики в целом и индексы доверия для видов экономической деятельности (ВД). Впервые на данных белорусской экономики проводится исследование эффективности использования статистических индикаторов по

¹⁵ Hardle, W. Applied nonparametric methods / W. Hardle, O. Linton // Handbook of Econometrics. – Amsterdam, 1994. – Vol. 4. – P. 2295–2339.

опросным данным в предиктивных эконометрических моделях. Разработана методика построения и применения моделей с марковскими переключениями состояний, включающих ИЭН. Устанавливается опережающий характер цикла рассчитываемого ИЭН по отношению к циклу реального ВВП, а также коинтеграционная зависимость сезонно скорректированного ИЭН с годовыми темпами роста реального ВВП. Построены три альтернативных варианта моделей с марковскими переключениями двух состояний («рост» и «спад»), основанных на установленной коинтеграционной зависимости между темпами роста реального ВВП и ИЭН. По результатам решения задач периодизации цикла и прогнозирования годовых темпов роста реального ВВП осуществлен выбор лучшей модели в виде модели с марковскими переключениями состояний MS-LR. Показано, что периодизация бизнес-цикла, полученная на основе модели MS-LR, имеет содержательную экономическую интерпретацию. Проведен сравнительный анализ точности прогнозирования годовых темпов роста реального ВВП для построенной модели MS-LR и моделей, не учитывающих механизм переключения состояний, основанных на свойствах коинтеграции и кобрейкинга используемых временных рядов. Установлено существенное преимущество модели MS-LR по точности прогнозов (для прогнозного периода сентябрь 2020 г. – январь 2021 г. значение MAPE менее 2 %).

6. Разработана новая методика статистического анализа и прогнозирования финансовой стабильности на микроуровне (уровне организаций) и макроуровне (уровне ВД и реального сектора экономики в целом) по неоднородным панельным данным финансовой отчетности организаций и заданным критериям риска дефолта в режиме обучения и самообучения [14, 19–21, 26, 27, 29, 34, 36, 38, 40, 41, 49, 65, 70, 72, 77–79, 81–84, 91, 94, 96, 101, 107]. На основе неоднородных панельных микроданных квартальной финансовой отчетности организаций в условиях, когда известные модели панельных данных бинарного и множественного выбора не применимы (отсутствует классифицированная обучающая выборка наблюдений, имеет место скрытая марковская зависимость номеров классов), в режиме «самообучения для заданных критериев риска дефолта разработана система статистических показателей *финансовой стабильности* в виде оценок вероятностей риска дефолта на *микроуровне* (уровне организаций) и *макроуровне* (уровне ВД и реального сектора экономики). С помощью эконометрического анализа и моделирования устанавливается опережающий характер построенных статистических показателей на макроуровне по отношению к базовым экономическим и пруденциальным показателям и темпам роста реального ВВП. Демонстрируются возможности применения разработанных статистических показателей для оценки кредитного риска в реальном секторе и прогнозирования пруденциальных показателей, а также для анализа циклических изменений экономической активности. Получены результаты решения задач анализа финансовой стабильности на основе предлагаемых показателей.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Различные положения разработанной методологии построения и анализа многомерных эконометрических моделей по нестационарным временным рядам с неоднородной структурой внедрены и использовались при построении систем эконометрических моделей СЭМ-ДКП-1 и СЭМ-ДКП-2 в Главном управлении монетарной политики и экономического анализа НБ РБ для анализа и прогнозирования денежно-кредитной политики при формировании согласованных социально-экономических и монетарных программ (справка об использовании результатов диссертационного исследования от 27.05.2015 № 37-13/8).

2. Разработанные методические и модельные средства для построения опережающих статистических индикаторов по опросным данным и их использования в задачах анализа бизнес-цикла и прогнозирования темпов роста белорусской экономики на основе эконометрических моделей, пакет программ *ESI Analysis (Economic Sentiment Index Analysis)*, реализующий методику, внедрены и используются Главным управлением монетарной политики и экономического анализа НБ РБ как дополнительный инструментарий для выработки комплексных мер в области денежно-кредитной и надзорной политики, а также экономической политики в целом (справка об использовании результатов диссертационного исследования от 21.11.2019 № 37-12/15).

3. Методика построения и применения статистических показателей финансовой стабильности реального сектора белорусской экономики на макро- и микроуровне с использованием данных финансовой отчетности организаций, включая: интегральные и доминирующие критерии риска дефолта; оценки априорных и апостериорных вероятностей риска дефолта; эконометрические модели зависимостей между пруденциальными и статистическими показателями, опережающие статистические индикаторы финансовой стабильности и реализующее указанную методику программное обеспечение «*Statistical Analysis of Financial Stability*» (SAFS) и «*System of Statistical Credit Ratings*» (SSCR) внедрены и используются Главным управлением монетарной политики и экономического анализа, Управлением финансовой стабильности НБ РБ как дополнительный инструментарий для выработки комплексных мер в области денежно-кредитной и надзорной политики, а также экономической политики в целом с целью раннего выявления системных рисков, причин и источников их возникновения (три справки об использовании результатов диссертационного исследования: от 27.05.2015 № 37-13/7, от 21.11.2019 № 37-12/17э, от 13.01.2020 № 37-12/2).

4. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебном процессе в форме методических указаний к компьютерным практикумам в БГУ и ГрГУ: «Компьютерный анализ данных и моделирование с помощью ППП IBM SPSS» (акт об использовании результатов научных исследований № 213 от 27.10.2013 г., БГУ); «Анализ и оценка кредитного риска с использованием экономико-математических и

эконометрических методов и моделей» (акт о внедрении результатов научной работы №03-81/021 от 26.03.14, ГрГУ); «Методический, модельный и алгоритмический инструментарий, а также программа ESI Analysis, реализующие методику построения и применения опережающих индикаторов» (акт о практическом использовании результатов исследования №326 от 30.12.2019 г., БГУ), а также используются для подготовки курсов лекций по дисциплинам «Эконометрика», «Моделирование финансового рынка», «Статистический анализ данных в экономике» в соответствии с разработанными типовыми и учебными программами по указанным дисциплинам в БГУ, а также в Учебном центре Национального банка Республики Беларусь в рамках регулярного учебно-практического семинара «Прикладная эконометрика».

5. По тематике диссертационного исследования подготовлено пять учебных пособий по эконометрическому моделированию, анализу финансовых рынков, компьютерному моделированию и анализу данных с грифами Минобразования РБ для специальности «Экономическая кибернетика» (четыре пособия) и с грифом Минобразования РФ (пособие, изданное в издательстве «Дело») для специальности «Математические методы в экономике». Три учебных пособия входят в список литературы «Программы кандидатского минимума по специальности 08.00.13 – математические и инструментальные методы экономики».

6. Результаты работы могут использоваться: в НБ РБ для разработки модельных и программных средств, предназначенных для выработки комплексных мер в области денежно-кредитной, надзорной и экономической политики с целью раннего выявления кредитных и системных рисков в условиях циклических изменений экономической активности; в аналитических подразделениях коммерческих банков для макроэкономического анализа и прогнозирования, а также для оценки кредитоспособности заемщиков; научно-исследовательских организациях Республики Беларусь для анализа и прогнозирования показателей экономической активности и финансовой стабильности на микро- и макроуровне.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монография

1. Малюгин, В.И. Методы анализа многомерных эконометрических моделей с неоднородной структурой. Научное издание / В.И. Малюгин. – Минск: БГУ, 2014. – 351 с.

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

2. Малюгин, В.И. Эконометрическое моделирование и прогнозирование с помощью пакета прикладных программ СЭМП / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин // Банковский Вестник. – 1999. – № 8 (82). – С. 23–24.

3. Development of econometric software for macroeconomic modelling and forecasting under transition / Yu. Kharin, V. Malugin, M. Pranovich, P. Rogatch // *Lithuanian Journal of Statistics*. – 2001. – № 39. – P. 74–77.

4. Система эконометрических моделей для прогнозирования и оценки вариантов денежно-кредитной политики / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, М.В. Пранович, Д.Л. Мурин // *Белорусский экономический журнал*. – 2003. – № 3. – С. 89–100.

5. Малюгин, В.И. О тестировании интегрированности и коинтегрированности макроэкономических временных рядов при наличии структурных изменений / В.И. Малюгин, А.А. Босько, Е.И. Ковзель // *Белорусская экономика: анализ, прогноз, регулирование. Экономический бюллетень НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2004. – № 11. – С. 45–54.

6. Система эконометрических моделей для анализа, прогнозирования и оценки вариантов денежно-кредитной политики / В.И. Малюгин, М.В. Пранович, Д.Л. Мурин, Д.Л. Калечиц // *Банковский вестник. Исследования банка*. – 2005. – № 1(2). – 41 с.

7. Эконометрическое моделирование и оценка вариантов денежно-кредитной политики / М.В. Пранович, Д.Л. Мурин, В.И. Малюгин, Д.Л. Калечиц // *Белорусский экономический журнал*. – 2005. – № 4. – С. 27–38.

8. Харин, Ю.С. Эконометрическое моделирование белорусской экономики на основе модели восточноевропейских экономик LAM-3 / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, А.С. Гурин // *Экономический бюллетень НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2006. – № 3. – С. 27–37.

9. О моделировании экономик России и Беларуси на основе эконометрической модели LAM-3 / В.В. Харемза, Ю.С. Харин, С.Б. Макарова, В.И. Малюгин, А.С. Гурин, Ю.В. Раскина // *Прикладная эконометрика*. – 2006. – № 2. – С. 124–139.

10. Моделирование и прогнозирование макроэкономических показателей экономик Беларуси, России и Украины на основе межстрановой модели LAM ICM / В.В. Харемза, Ю.С. Харин, С.Б. Макарова, В.И. Малюгин, В.Н. Майковская, А.С. Гурин, Ю.В. Вымятина, Ю.В. Раскина // *Экономический бюллетень НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2007. – № 4. – С. 18–34.

11. Малюгин, В.И. Оценка устойчивости коммерческих банков на основе эконометрических моделей с дискретными зависимыми переменными / В.И. Малюгин, Е.В. Пытляк // *Банковский Вестник*. – 2007. – № 4(369). – С. 30–36.

12. Малюгин, В.И. О коррекции прогнозов на основе эконометрических моделей со структурными изменениями в начале прогнозного периода / В.И. Малюгин, А.В. Бояр // *Экономический бюллетень НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь*. – 2008. – № 4. – С. 28–40.

13. Малюгин, В.И. Дискриминантный анализ многомерных автокоррелированных регрессионных наблюдений в условиях параметрической неоднородности моделей / В.И. Малюгин // *Информатика*. – 2008. – № 3(19). – С. 17–28.

14. Гринь, Н.В. Исследование точности методов классификации многомерных данных в задачах кредитного скоринга / Н.В. Гринь, В.И. Малюгин // Вестник ГрГУ. Сер. 2. – 2008. – № 1. – С. 77–85.

15. Малюгин, В.И. Статистический анализ смесей распределений регрессионных наблюдений / В.И. Малюгин // Информатика. – 2008. – № 4 (20). – С. 79–88.

16. Харин, Ю.С. Вероятностно-статистическое прогнозирование, оптимальность, робастность, применения / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин // Вестник БГУ. Серия 1: Физика. Математика. Информация. – 2009. – № 1. – С. 72–84.

17. Разработка и применение эконометрических моделей для прогнозирования и оценки вариантов денежно-кредитной политики / В.И. Малюгин, М.В. Демиденко, Д.Л. Калечиц, А.Ю. Миксюк, Т.В. Цукарев // Прикладная эконометрика. – 2009. – № 2. – С. 24–38.

18. Малюгин, В.И. Асимптотический анализ риска непараметрической классификации в случае существенно зависимых признаков / В.И. Малюгин // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2009. – № 3. – С. 10–24.

19. Малюгин, В.И. Исследование эффективности алгоритмов классификации заемщиков банков (на основе балансовых коэффициентов) / В.И. Малюгин, О.И. Корчагин, Н.В. Гринь // Банковский вестник. – 2009. – № 7. – С. 26–33.

20. Малюгин, В.И. Об эффективности статистических алгоритмов кредитного скоринга / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Банковский вестник. – 2010. – № 31. – С. 39–46.

21. Гринь, Н. В. Проблемы разработки и применения компьютерных систем кредитного скоринга / Н. В. Гринь, В.И. Малюгин // Экономика, моделирование, прогнозирование: сб. науч. тр. / НИЭИ М-ва экономики Респ. Беларусь; редкол.: М.К. Кравцов [и др.]. – Минск, 2011. – Вып. 5. – С. 176–187.

22. Малюгин, В.И. Прогнозирование VaR в условиях неоднородной волатильности рынка / В.И. Малюгин, А.А. Петрушко // Банковский Вестник. – 2011. – № 3. – С. 33–40.

23. Малюгин, В.И. Непараметрический анализ стохастических систем с нелинейной функциональной неоднородностью / В.И. Малюгин, М.Е. Васильков // Прикладная эконометрика. – 2011. – № 2. – С. 78–97.

24. Малюгин, В.И. Эконометрическое прогнозирование национальной экономики / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин // Наука и инновации. – 2011. – № 12. – С. 24–26.

25. Малюгин, В.И. Дискриминантный анализ многомерных авторегрессионных моделей с неоднородной структурой / В.И. Малюгин // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2013. – № 3. – С. 43–53.

26. Система статистических кредитных рейтингов предприятий: методика построения, верификации и применения / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, П.С. Милевский, А.И. Зубович // Банковский вестник. Тематический выпуск «Исследования банка». – 2013. – № 5. – 73 с.

27. Гринь, Н.В. Алгоритм дискриминантного анализа с областями неопределенности в случае произвольного числа классов и его применение для оценки кредитных рейтингов / Н.В. Гринь, В.И. Малюгин // Экономика, моделирование, прогнозирование: сб. науч. тр. / НИЭИ М-ва экономики Респ. Беларусь; редкол.: М.К. Кравцов [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 7. – С. 131–141.

28. Новопольцев, А.Ю. Эконометрическое прогнозирование на основе многомерных регрессионных моделей с несколькими классами состояний / А.Ю. Новопольцев, В.И. Малюгин // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2014. – Вып. 8. – С. 206–214.

29. Malugin, V.I. Statistical analysis and econometric modelling of the creditworthiness of non-financial companies / V.I. Malugin, N.V. Hryn, A.Yu. Novopoltsev // Int. J. Computational Economics and Econometrics. – 2014. – Vol. 4(1/2). – P. 130–147.

30. Малюгин, В.И. Анализ многомерных статистических моделей с неоднородной структурой в случае скрытой марковской зависимости состояний / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2015. – № 2. – С. 26–36.

31. Малюгин, В.И. Алгоритмы тестирования циклических структурных изменений в моделях векторной авторегрессии с переключением состояний / В.И. Малюгин // Информатика. – 2015. – № 4 (20). – С. 79–88.

32. Малюгин, В.И. Об использовании векторных авторегрессионных моделей с переключающимися состояниями для анализа и прогнозирования циклов экономической активности / В.И. Малюгин // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М. К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2015. – Вып. 9. – С. 183–196.

33. Malugin, V. Statistical Estimation and Classification Algorithms for Regime-Switching VAR Model with Exogenous Variables / V. Malugin, A. Novopoltsev // Austrian Journal of Statistics. – 2017. – Vol. 46. – P. 47–56.

34. Малюгин, В.И. Статистический анализ кредитоспособности национальной экономики на основе финансовой отчетности предприятий / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, А.Ю. Новопольцев // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2017. – Вып. 11. – С. 241–257.

35. Малюгин, В.И. О построении и применении индекса экономических настроений белорусской экономики / В.И. Малюгин, Д.Э. Крук // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2017. – Вып. 12. – С. 233–247.

36. Статистический анализ кредитоспособности реального сектора белорусской экономики на основе микроданных / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев, Н.В. Гринь, П.С. Милевский // Банковский вестник. Тематический выпуск «Исследования банка». – 2018. – № 14. – 98 с.

37. Макаревич, А.С. Сравнительный анализ фильтров Ходрика – Прескотта и Хамильтона при оценивании поворотных точек бизнес-цикла и индекса экономических настроений белорусской экономики / А.С. Макаревич, В.И. Малюгин // Банковский вестник. – № 8. – 2018. – С. 49–56.

38. Малюгин, В.И. Эконометрический анализ пруденциальных и предлагаемых статистических показателей кредитоспособности и финансовой устойчивости банковской системы / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / Редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2018. – Вып. 13. – С. 192–202.

39. Малюгин, В.И. Индекс экономических настроений белорусской экономики: методические, модельные и инструментальные средства построения и применения / В.И. Малюгин, Д.Э. Крук, П.С. Милевский // Банковский вестник. Тематический выпуск «Исследования банка». – 2019. – №16. – 30 с.

40. Разработка модельного инструментария для оценки и прогнозирования кредитного риска банков на микроуровне / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев, Н.В. Гринь, А.В. Пашкевич // Банковский вестник. Тематический выпуск «Исследования банка». – 2019. – №18. – 71 с.

41. Малюгин, В.И. Анализ финансовой стабильности реального сектора экономики на основе микроданных: макроэкономический аспект / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев // Банковский вестник. – 2019. – №10. – С. 29–36.

42. Малюгин, В.И. Анализ и прогнозирование стоимости потребительской корзины в режиме реального времени / В.И. Малюгин, А.В. Якубович // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2020. – Вып. 14. – С. 235–241.

43. Малюгин, В.И. Модель MS-VARX и ее применение для анализа бизнес-цикла белорусской экономики / В.И. Малюгин, А.С. Макаревич // Банковский вестник. – 2020. – № 4. – С. 22–31.

44. Малюгин, В.И. Анализ экономических циклов с использованием моделей с марковскими переключениями состояний и опережающим индикатором / В.И. Малюгин // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2021. – Вып. 15. – С. 226–235.

Статьи в других научных изданиях

45. Харин, Ю.С. Проблемы эконометрического моделирования переходной экономики / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин // Формирование экономических и социальных основ белорусской государственности: сб. науч. ст. / Министерство экономики РБ. – Минск: Институт экономики НАН Беларуси, 1998. – С. 103–109.

46. Математическое и программное обеспечение эконометрического моделирования и прогнозирования важнейших макроэкономических показателей / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин, Д.Л. Мурин, П.П. Рогач, С.Н. Сталевская // Формирование экономических и социальных основ белорусской государственности: сб. науч. ст. / Министерство экономики РБ. – Минск: Институт экономики НАН Беларуси, 1998. – С. 110–116.

47. Малюгин, В.И. Исследование и применение теста суперэкзогенности в структурных эконометрических моделях при анализе экономической политики / В.И. Малюгин, А.Ю. Миксюк // Экономика. Моделирование. Прогнозирование; редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2007. – Вып. 1. – С. 187–203.

48. Применение эконометрических моделей для прогнозирования и оценки вариантов денежно-кредитной политики / В.И. Малюгин, М.В. Демиденко, Д.Л. Калечиц, Т.В. Цукарев // Экономика и банки. – №1. – 2008. – С. 31–34.

49. Малюгин, В.И. Анализ и прогнозирование кредитного риска на основе эконометрических моделей / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Экономика. Моделирование. Прогнозирование; редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2008. – Вып. 2. – С. 260–277.

50. Малюгин, В.И. Экстраполяция временных рядов при заданных целевых значениях экономических переменных / В.И. Малюгин, В.К. Букато // Экономика. Моделирование. Прогнозирование; редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2009. – Вып. 3. – С. 26–37.

51. Малюгин, В.И. Эконометрическое прогнозирование состояния экономических систем в условиях функциональной неоднородности моделей / В.И. Малюгин, М.Е. Васильков // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2012. – Вып. 4. – С. 266–277.

52. Михаленок, Ю.М. Модели ковариационных матриц доходностей финансовых активов в задачах многопериодного оптимального портфельного инвестирования / Ю.М. Михаленок, В.И. Малюгин // Экономика. Моделирование. Прогнозирование / Редкол.: М.К. Кравцов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2012. – Вып. 6. – С. 168–181.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

53. Малюгин, В.И. Классификация регрессионных наблюдений с автокоррелированными ошибками / В.И. Малюгин // Современные проблемы компьютерного анализа данных и моделирования : ред. Ю.С. Харин. – Минск: БГУ, 1993 – С. 53–58.

54. Пранович, М.В. Эконометрическое моделирование процессов инфляции в условиях переходной экономики / М.В. Пранович, В.И. Малюгин // Проблемы актуарной и финансовой математики : материалы междунаро. науч. конф., Минск, 27–29 июня 2000 г.; редкол: Г.А. Медведев [и др.]. – Минск: БГУ, 2000. – С. 176–181.

55. Малюгин, В.И. Эконометрическое моделирование процессов инфляции в условиях переходной экономики / В.И. Малюгин // Проблемы актуарной и финансовой математики : материалы междунар. науч. конф., Минск, 20–22 июня 2002 г., : редкол: Г.А. Медведев [и др.]. – Минск: БГУ, 2002. – С.165–169.

56. Малюгин, В.И. Асимптотический анализ риска непараметрической классификации в пространстве существенно зависимых признаков / В.И. Малюгин // Информационные системы и технологии: материалы I Междунар. конфер., Минск, 5–8 ноября 2002 г. / Бел. гос. ун-т; редкол.: А.Н. Курбацкий [и др.]. – Минск: БГУ, 2002. – С. 261–266.

57. Basko, A.A. The model of the inflation based on the money demand function and the manufacturing costs in Belarusian economy / A.A. Basko, V.I. Malugin // Computer data analysis and modeling: proceedings of 7th International conference, Minsk, 6–10 September 2004: in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2004. – Vol. 2. – P. 24–28.

58. Malugin, V.I. Analysis of structural changes in multivariate economic time series by means of statistical classification procedures / V.I. Malugin // Computer data analysis and modeling: proc. of 7th International conference, Minsk, 6–10 September 2004: in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2004. – Vol. 2. – P. 63–67.

59. Харин, Ю.С. О построении эконометрической модели ЛАМ-3 для национальной экономики / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, А.С. Гурин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития в регионе ЦЕИ : материалы VI международной научной конференции, Минск, 20–21 октября 2005 г. : в 4 т.; редкол.: С.С. Полоник [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2005. – Т. 1. – С. 481–488.

60. Boyar, A.V. Evaluation of Forecasting Algorithms for Multivariate Econometric Models with Structural Breaks in the Forecasting period / A.V. Boyar, V.I. Malugin // Computer data analysis and modeling: proc. of 8th International conference, Minsk, 11–15 September 2007: in 2 vol. / Belarusian State University; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk, 2007. – Vol. 2. – P. 56–59.

61. Egorov, A.A. Analysis of the banking crises by the panel logit model with the application to Belarusian banking / A.A. Egorov, V.I. Malugin // Computer data analysis and modeling: proceedings of 8th International conference, Minsk, 11–15 September 2007: in 2 vol. / Belarusian State University; ed.: [et al.]. Yu. Kharin. – Minsk, 2007. – Vol. 2. – P. 68–71.

62. Inter-Country Econometric Model of the Economies of Belarus, Russia and Ukraine / W. Charemza, Yu. Kharin, S. Makarova, V. Malugin // Computer data analysis and modeling: proc. of 8th International conference, Minsk, 11–15 September 2007 : in 2 vol. / Belarusian State University; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk, 2007. – Vol. 1. – P. 26–34.

63. Межстрановая эконометрическая модель экономик Беларуси, России, Украины / В.В. Харемза, Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, С.Б. Макарова // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : матер. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 18–19 окт. 2007 г. : в 4 т.; редкол.: Полоник С.С. [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2007. – Т. 1. – С. 374–384.

64. Малюгин, В.И. Алгоритм статистического оценивания параметров модели многомерной динамической регрессии / В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и приложения : сборник научн. статей Междунар. научн. конф., Минск, 15–19 сентября 2008 г.; редкол.: Г.А. Медведев [и др.]. – Минск: БГУ, 2008. – С. 195–200.

65. Малюгин, В.И. Анализ и прогнозирование кредитоспособности заемщиков банков / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития: материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 16–17 октября 2008 г. : в 4 т.; редкол.: С.С. Полоник [и др.]. – Мн.: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь. – 2008. – Т. 1. – С. 512–527.

66. Малюгин, В.И. Методы анализа эконометрических моделей со структурной неоднородностью / В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и приложения : материалы Междунар. научн. конф., Минск, 16–17 ноября 2009 г.; редкол.: Г.А. Медведев [и др.]. – Минск: РИВШ, 2009. – Вып. 2. – С. 106–113.

67. Малюгин, В.И. Эконометрическое моделирование и прогнозирование в условиях структурной неоднородности моделей / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 15–16 октября 2009 г.: в 4 т.; редкол.: С.С. Полоник [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2009. – Т. 1. – С. 414–421.

68. Малюгин, В.И. Разработка и применение эконометрических моделей для анализа денежно-кредитной политики в Национальном банке Республики Беларусь / В.И. Малюгин, М.В. Демиденко // Белорусская статистика: вчера, сегодня, завтра: науч.-практич. междунар. конф., Минск, 23–24 августа 2010 г.; редкол.: И.А. Костевич [и др.]. – Минск: Нац. стат. комитет Респ. Беларусь, 2010. – С. 314–319.

69. Malugin, V.I. Nonparametric analysis of stochastic systems with nonlinear functional heterogeneity / V.I. Malugin, M.E. Vasilkov // Computer data analysis and modeling : proc. of 9th Internat. conf., Minsk, 7–11 September 2010 : in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2010. – Vol. 1. – P. 81–84.

70. Malugin, V.I. On the using of econometric models in credit scoring systems / V.I. Malugin, N.V. Hryn // Computer data analysis and modeling : proc. of 9th Internat. conf., Minsk, 7–11 September 2010 : in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2010. – Vol. 2. – P. 156–159.

71. Малюгин, В.И. Оценка и прогнозирование рыночных рисков на основе динамических эконометрических моделей волатильности с засорениями / В.И. Малюгин, А.А. Петрушко // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XI Междунар. науч. конф., Минск, 14–15 октября 2010 г.: в 5 т.; редкол.: А.В. Червяков [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2010. – Т. 1. – С. 241–256

72. Алгоритмическое и программное обеспечение компьютерных систем кредитного скоринга / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, А.Е. Алексеев, П.В. Банцевич // Информационные системы и технологии : материалы VI Международной конференции, Минск, 24–25 ноября 2010 г.; редкол.: А.Н. Курбацкий [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – С. 150–153.

73. Малюгин, В.И. Методы анализа сложных систем на основе статистических моделей с функционально неоднородной структурой / В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и их приложения : материалы междунар. конф., Минск, 22–25 февраля 2010 г.; редкол.: Н.Н. Труш [и др.]. – Минск: РИВШ, 2010. – С. 225–232.

74. Мирончик, Н.Л. Модельный инструментарий Национального банка Республики Беларусь в системе анализа, прогнозирования и проектирования денежно-кредитной политики / Н.Л. Мирончик, М.В. Демиденко, В.И. Малюгин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития: материалы XII Междунар. науч. конф., Минск, 20–21 октября 2011 г. : в 3 т.; редкол.: А.В. Червяков [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2011. – Т. 1. – С. 104–121.

75. Малюгин, В.И. Непараметрическое регрессионное прогнозирование на основе ядерной оценки многомерной плотности / В.И. Малюгин // Международный конгресс по информатике (CSIST '2011) : материалы междунар. науч. конгресса, Минск, 31 октября – 3 ноября 2011 г.: в 2 ч.; редкол.: С.В. Абламейко [и др.]. – Минск: БГУ, 2011. – Ч. 1. – С. 101–106.

76. Михаленок, Ю.М. Оптимизация портфеля финансовых активов на основе многомерной модели волатильности / Ю.М. Михаленок, В.И. Малюгин // Международный конгресс по информатике (CSIST '2011): материалы междунар. науч. конгресса, Минск, 31 октября – 3 ноября 2011 г.: в 2 ч.; редкол.: С.В. Абламейко [и др.]. – Минск, 2011. – Ч. 1. – С. 109–113.

77. Малюгин, В.И. Оценка и анализ динамики кредитных рейтингов нефинансовых предприятий на основе статистических методов и моделей / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Математическое моделирование в управлении рисками : материалы междунар. науч. конф., Саратов, 3–5 сентября 2012 г.; редкол.: В.А. Балаш [и др.]. – Саратов: СГУ, 2012. – С. 78–80.

78. Разработка и применение статистической методики оценки и анализа динамики кредитоспособности нефинансовых предприятий / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, П.С. Милевский, А.И. Зубович // Проблемы прогнозирования и госу-

дарственного регулирования социально-экономического развития : материалы XIII Междунар. науч. конф., Минск, 24–25 октября 2012 г. В 5 т.; редкол.: А.В. Червяков [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2012. – Т. 1. – С. 278–289.

79. Hryn, N.V. Statistical company's credit ratings and their econometric analysis / N.V. Hryn, V.I. Malugin, Yu. Novopolitsev // Computer data analysis and modeling : proc. of 9th Internat. conf., Minsk, 10–14 September 2013 : in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2013. – Vol. 2. – P. 156–159.

80. Malugin, V.I. Testing for structural heterogeneity in vector autoregressive model by means of statistical classification methods / V.I. Malugin // Computer data analysis and modeling: proceedings of 9th Internat. conf., Minsk, 10–14 September 2013 : in 2 vol. / Belarusian State University; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2013. – Vol. 1. – P. 78–82.

81. Анализ и прогнозирование статистических кредитных рейтингов на основе эконометрических моделей / Н.В. Гринь, В.И. Малюгин, П.С. Милевский, А.И. Зубович // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XIV Междунар. науч. конф., Минск, 24–25 октября 2013 г. В 3 т.; редкол.: А.В. Червяков [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2013. – Т. 1. – С. 151–163.

82. Новопольцев, А.Ю. Статистический анализ кредитоспособности в условиях скрытой марковской зависимости рейтингов / А.Ю. Новопольцев, В.И. Малюгин // Международный конгресс по информатике (CSIST '2013) : материалы междунар. науч. конгресса, Минск, 4–7 ноября 2013 г.; редкол.: С.В. Абламейко [и др.]. – 2013. – С. 83–87.

83. Малюгин, В.И. Компьютерные и информационные технологии комплексного решения прикладных задач многомерного статистического анализа данных / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Информатизация образования: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 октября 2014 г. – Минск: БГУ, 2014. – С. 268–271.

84. Гринь, Н.В. Статистическая методика построения, анализа и верификации системы относительных кредитных рейтингов / Н.В. Гринь, В.И. Малюгин // Применение многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества: труды X Междунар. конф., Москва, 26–28 августа 2014 г. – Москва: ЦЭМИ РАН, 2014. – С. 67–69.

85. Малюгин, В.И. Статистический анализ экономических циклов на основе модели VARX с переключающимися состояниями / В.И. Малюгин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития: материалы Междунар. конф., Минск, 23–24 октября 2014 г. В 3 т.; редкол.: А.В. Червяков [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2014. – Т. 1. – С. 122–133.

86. Малюгин, В.И. Анализ структурных изменений в моделях VARX с использованием статистических решающих правил / В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и их приложения : сб. научн. ст. ; редкол. Н.Н. Труш [и др.]. – Минск: РИВШ. – 2014. – С. 124–129.

87. Новопольцев, А.Ю. Статистический анализ векторных авторегрессионных моделей с переключениями состояний / А.Ю. Новопольцев, В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и их приложения : сб. научн. ст. : редкол. Н.Н. Труш [и др.]. – Минск: РИВШ. – 2014. – С. 171–176.

88. Малюгин, В.И. Анализ циклических изменений временных рядов на основе моделей RS-VARX / В.И. Малюгин // Теория вероятностей, математическая статистика и приложения: материалы междунар. конф., Минск, 23–26 февраля 2015 г.; редкол.: Н.Н. Труш [и др.]. – Минск: РИВШ, 2015. – С. 142–149.

89. Малюгин, В.И. О построении индекса экономических настроений по данным конъюнктурных опросов белорусских нефинансовых организаций / В.И. Малюгин, Е.В. Кондратович, Л.С. Гилевская // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы Междунар. конф., Минск, 23 октября 2015 г.. В 3 т. редкол.: А.В. Червяков [и др.]. Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2015. – Т. 1. – С. 165–170.

90. Malugin, V.I. Statistical estimation and testing of turning points in multivariate regime switching models / V.I. Malugin, A.Yu. Novopoltsev // Computer data analysis and modeling : proc. of 10th Internat. conf., Minsk, 6–10 September 2016 : in 2 vol.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2016. – Vol. 2. – 2016. – P. 204–209.

91. Малюгин, В.И. Анализ кредитоспособности национальной экономики на основе финансовой отчетности предприятий: методические и программные средства / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь, А.Ю. Новопольцев // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XVII Междунар. конф., Минск, 21–22 октября 2016 г. В 3 т. : редкол.: А.В. Червяков [и др.] – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2016. – Т. 1. – С. 187–191.

92. Малюгин, В.И. Анализ сложных систем на основе многомерных регрессионных моделей с переключением состояний / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев // Международный конгресс по информатике (CSIST '2016): материалы Междунар. науч. конгресса, Минск, 24–27 октября 2016 г.; редкол.: С.В. Абламейко [и др.]. – 2016. – С. 458–462.

93. Модельные и инструментальные средства для построения и применения индекса экономических настроений белорусской экономики / В.И. Малюгин, Д.Э. Крук, Е.В. Кондратович, Е.С. Бабахин, П.С. Милевский // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития: материалы XVIII Междунар. конф., Минск, 19–20 октября 2017 г.: В 3 т. : редкол.: В.В. Пинигин [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2017. – Т. 1. – С. 178–188.

94. Анализ финансовой стабильности экономики на основе микроданных и экспертных критериев дефолта / В.И. Малюгин, А.Ю. Новопольцев, Н.В. Гринь, А.В. Пашкевич // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития: материалы XIX Междунар. конф., Минск, 18–19 октября 2018 г. В 3 т. : редкол.: В.В. Пинигин [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2018. – Т. 1. – С. 120–130.

95. Malugin, V. Classification and prediction of the gaming activity in online-games based on the regime switching models / V. Malugin, Y. Babakhin // Pattern Recognition and Information Processing : proc. of the 14th Internat. conf., Minsk, Belarus, 21–23 May 2019 / Belarusian State University; ed.: S.V. Ablameyko [et al.]. – Minsk: BSU, 2019. – P. 175–177.

96. Malugin, V.I. Analysis of the financial stability of the economy based on micro-data and expert information / V.I. Malugin, A.Yu. Navapolitseu, N.V. Hryn // Computer data analysis and modeling : proc. of 10th Internat. conf., Minsk, 18–22 September 2019.; ed.: S. Aivazian [et al.]. – Minsk: BSU, 2019. – P. 228–231.

97. Малюгин, В.И. Статистические макроэкономические индикаторы на основе микроданных и их применение для анализа белорусской экономики / В.И. Малюгин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XX Междунар. конф., Минск, 17–18 октября 2019 г. В 3 т. : редкол.: Ю.А. Медведева [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2019. – Т. 1. – С. 177–183.

98. Малюгин, В.И. Анализ бизнес-цикла белорусской экономики на основе моделей с переключениями состояний и экзогенными переменными / В.И. Малюгин // Тенденции экономического развития в XXI веке : материалы II Междунар. конф. Минск, 28 февраля 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: А.А. Королёва [и др.] – Минск. БГУ. 2020. – С. 176–179.

99. Малюгин, В.И. Модели с марковскими переключениями состояний и экзогенными переменными MS-VARX и их применение для анализа бизнес-цикла белорусской экономики / В.И. Малюгин // Многомерный статистический анализ, эконометрика и моделирование реальных процессов : труды X Междунар. школы-семинара, Москва, 28 апреля 2020 г.; редкол.: В.Л. Макарова [и др.]. – Москва: ЦЭМИ РАН, 2020. – С. 83–85.

100. Малюгин, В.И. Анализ циклов экономической активности на основе моделей с марковскими переключениями состояний / В.И. Малюгин // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XXI Междунар. конф., Минск, 22–23 октября 2020 г.: в 3 т.: редкол.: Ю.А. Медведева [и др.]. – Минск: НИЭИ Мин-ва экономики Респ. Беларусь, 2020. – Т. 1. – С. 119–127.

101. Малюгин, В.И. Использование микроданных для анализа финансовой стабильности белорусской экономики / В.И. Малюгин // Материалы IV Российского экономического конгресса «РЭК–2020». Тематическая конференция «Прикладная эконометрика», Москва, 21–25 декабря 2020 г.; редкол.: М.Ю. Афанасьев [и др.] – М., 2020. – Т.5. – С. 54–57.

Тезисы докладов

102. Malugin, V.I. Econometric Analysis of Features of Belarusian Macroeconomic Time Series / V.I. Malugin // 8th International Conference on Probability Theory and Mathematical Statistics: Abstracts of Communications, Vilnius, June 23–29, 2002. – TEV Vilnius, 2020. – P. 193.

103. Малюгин, В.И. Методы анализа кредитного риска на основе эконометрических моделей / В.И. Малюгин, Н.В. Гринь // Белорусская математическая конференция : тезисы докладов Междунар. конф., Минск 3–7 ноября 2008 г.; редкол.: С.Г. Красовский [et al.]. – Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2008. – Ч. 5. – С. 53–54.

104. Малюгин, В.И. Моделирование и прогнозирование экономических систем в условиях структурной неоднородности моделей / В.И. Малюгин, Ю.С. Харин // Математическое моделирование и дифференциальные уравнения : тезисы докладов международной конференции, Минск, 24–28 августа, 2009 г.; редкол.: В.И. Корзюк [и др.]. – Минск: Ин-т математики НАН Беларуси, 2009. – Ч. 2. – С. 164–165.

105. Малюгин, В.И. Использование методов дискриминантного и кластерного анализа статистических зависимостей в задачах анализа и прогнозирования кредитных рейтингов / В.И. Малюгин // Информационные системы и технологии : материалы V Международной конференции-форума, Минск, 16–17 ноября 2009 г. : в 2 ч.; редкол.: Н.И. Листопад [и др.]. – Минск: А.Н. Вараксин, 2009. – Ч. 1. – С. 162–163.

106. Малюгин, В.И. Методы дискриминантного анализа моделей VARX / В.И. Малюгин // Белорусская математическая конференция : тезисы докладов; редкол.: С.Г. Красовский, А.А. Лепин: в 5 ч. – Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2012. – Ч. 4. – С. 65–66.

107. Гринь, Н.В. Статистические методы построения рейтинговых систем при отсутствии классифицированной обучающей выборки / Н.В. Гринь, В.И. Малюгин // Белорусская математическая конференция : тезисы докладов; редкол.: С.Г. Красовский, А.А. Лепин: в 5 ч. – Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2012. – Ч. 4. – С. 56–57.

108. Malugin, V.I. Statistical classification algorithms for multivariate regime switching models / V.I. Malugin // Белорусская математическая конференция, Минск, 5–10 сентября 2016 г. : тез. докл. междунар. науч. конф. в 5 ч. ; редкол.: С.Г. Красовский [и др.]. – Минск: Институт математики НАН Беларуси, 2016. – Часть 4. – С. 43–44.

109. Malugin, V.I. Regime switching models: Independent switching versus Markov switching / V.I. Malugin // Logistics Analytics: EURO mini-conference : Abstracts of Communications, Minsk, June 18–19, 2018. – Minsk, 2018. – P. 19.

110. Novopoltsev, A.Yu. Statistical analysis and modelling of macro processes using microdata / A.Yu. Novopoltsev, V.I. Malugin // Logistics Analytics: EURO mini-conference : Abstracts of Communications, Minsk, June 18–19, 2018. – Minsk, 2018. – P. 20.

111. Малюгин, В.И. Модели с марковскими переключениями состояний и их применение для анализа и прогнозирования циклических изменений / В.И. Малюгин // XIII Белорусская математическая конференция : материалы междунар. науч. конф. Минск, 22–25 ноября 2021 г.: в 2 ч.; сост. В.В. Лепин. – Минск: Беларуская навука, 2021. – Ч.2 – С. 67–68.

Учебные пособия

112. Основы имитационного и статистического моделирования / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, В.П. Кирлица, В.И. Лобач, Г.А. Хацкевич. – Минск: ДизайнПРО, 1997. – 288 с.

113. Малюгин, В.И. Рынок ценных бумаг: количественные методы анализа: учебное пособие / В.И. Малюгин. – Минск: БГУ, 2001. – 318 с.

114. Малюгин, В.И. Рынок ценных бумаг: количественные методы анализа: учебное пособие / В.И. Малюгин. – Москва: Дело, 2003. – 320 с.

115. Харин, Ю.С. Эконометрическое моделирование: учебное пособие / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, А.Ю. Харин. – Минск: БГУ, 2003. – 313 с.

116. Харин, Ю.С. Математические и компьютерные основы статистического моделирования и анализа данных: учебное пособие / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, М.С. Абрамович. – Минск: БГУ, 2008. – 455 с.

РЭЗІЮМЭ

Малюгін Уладзімір Ільіч

Метады пабудовы шматмерных эканаметрычных мадэляў з неаднароднай структурай і іх прымяненне для прагназавання эканамічнай актыўнасці і фінансавай стабільнасці

Ключавыя словы: эканаметрычныя мадэлі з пераклучэннем станаў, аналіз панэльных мікрададзены ў рэжыме навучання і саманавучання, статыстычныя паказчыкі крэдытаздольнасці і фінансавай стабільнасці, прагназаванне эканамічнай актыўнасці і фінансавай стабільнасці.

Мэта працы: распрацоўка метадаў пабудовы шматмерных эканометрычных мадэляў часовых шэрагаў і панэльных дадзеных з неаднароднай параметрычнай і функцыянальнай структурай, абумоўленай зменай класаў станаў эканамічных працэсаў, на аснове статыстычных вырашальных правілаў, а таксама метады іх прымянення для аналізу эканамічнай актыўнасці і фінансавай стабільнасці беларускай эканомікі ва ўмовах цыклічных структурных змен, абумоўленых шокавымі ўздзеяннямі на эканоміку.

Метады даследавання: метады эканаметрычнага аналізу, мадэлявання і прагназавання, метады аналізу панэльных мікрададзеных з неаднароднай структурай у рэжыме навучання і саманавучання, метады фінансава-эканамічнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: новыя метады пабудовы вектарных аўтарэгрэсійных мадэляў з экзагеннымі пераменнымі і шматмерных рэгрэсійных мадэляў у выпадку незалежных і маркаўскіх пераклучэнняў класаў станаў эканамічных працэсаў у рэжыме навучання і саманавучання, а таксама метады пабудовы мадэлі шматмернай непараметрычнай рэгрэсія у рэжыме навучання, прызначаныя для класіфікацыі станаў і прагназавання эканамічных працэсаў; новыя метадыкі аналізу эканамічнай актыўнасці і фінансавай стабільнасці беларускай эканомікі на аснове распрацаваных па мікрададзеных статыстычных індыхатараў эканамічнай актыўнасці і фінансавай стабільнасці, а таксама мадэляў з маркоўскімі пераклучэннямі стану, якія ўключаюць экзагенныя пераменныя.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнага даследавання ўкаранёны і выкарыстоўваюцца ў Галоўным упраўленні манетарнай палітыкі і эканамічнага аналізу і Упраўленні фінансавай стабільнасці Нацыянальнага банка Рэспублікі Беларусь як дадатковы інструментарый для выпрацоўкі комплексных мер у галіне грашова-крэдытнай, нагляднай і эканамічнай палітыкі, а таксама ў навучальным працэсе.

Вобласць прымянення: аналіз і прагназаванне эканамічнай актыўнасці ва ўмовах шокавых уздзеянняў з выкарыстаннем статыстычных індыхатараў па аптальных дадзеных, статыстычны аналіз і эканаметрычнае прагназаванне крэдытаздольнасці і фінансавай стабільнасці на мікра- і макраўзроўні на аснове фінансавай справаздачнасці прадпрыемстваў і зададзеных крытэрыяў рызыкі дэфолту.

Малюгин Владимир Ильич

Методы построения многомерных эконометрических моделей с неоднородной структурой и их применение для прогнозирования экономической активности и финансовой стабильности

Ключевые слова: эконометрические модели с переключением состояний, анализ панельных микроданных в режиме обучения и самообучения, статистические показатели кредитоспособности и финансовой стабильности, прогнозирование экономической активности и финансовой стабильности.

Цель работы: разработка методов построения многомерных эконометрических моделей временных рядов и панельных данных с неоднородной параметрической и функциональной структурой, обусловленной сменой классов состояний экономических процессов, на основе статистических решающих правил, а также методик их применения для анализа экономической активности и финансовой стабильности белорусской экономики в условиях циклических структурных изменений, обусловленных шоковыми воздействиями на экономику.

Методы исследования: методы эконометрического анализа, моделирования и прогнозирования, методы анализа панельных микроданных с неоднородной структурой в режиме обучения и самообучения, методы финансово-экономического анализа.

Полученные результаты и их новизна: новые методы построения векторных авторегрессионных моделей с экзогенными переменными и многомерных регрессионных моделей в случае независимых и марковских переключений классов состояний экономических процессов в режиме обучения и самообучения, а также методы построения модели многомерной непараметрической регрессии с независимыми переключениями состояний в режиме обучения, предназначенные для классификации состояний и прогнозирования экономических процессов; новые методики анализа экономической активности и финансовой стабильности белорусской экономики на основе разработанных по микроданным статистических индикаторов экономической активности и финансовой стабильности, а также моделей с марковскими приключениями состояний с экзогенными переменными.

Степень использования: результаты диссертационного исследования внедрены и используются в Главном управлении монетарной политики и экономического анализа и Управлении финансовой стабильности Национального банка Республики Беларусь как дополнительный инструментарий для выработки комплексных мер в области денежно-кредитной, надзорной и экономической политики, а также в учебном процессе.

Область применения: анализ и прогнозирование экономической активности в условиях шоковых воздействий с использованием статистических индикаторов по опросным данным, статистический анализ и эконометрическое прогнозирование кредитоспособности и финансовой стабильности на микро- и макроуровне на основе финансовой отчетности предприятий и заданных критериев риска дефолта.

SUMMARY

Malugin Vladimir Ilyich

Methods for building multivariate econometric models with a heterogenous structure and their application for forecasting economic activity and financial stability

Keywords: state-switching econometric models, analysis of panel microdata using statistical learning and machine-learning methods, statistical indicators of creditworthiness and financial stability, forecasting of economic activity and financial stability.

Purpose of the work: development of methods for building multivariate econometric models of time series and panel data with a heterogeneous parametric and functional structure, due to a change in the classes of states of economic processes, based on statistical decision rules, as well as methodologies for their application to analyze the economic activity and financial stability of the Belarusian economy in conditions of cyclical structural changes caused by shock effects on the economy.

Research methods: methods of econometric analysis, modeling and forecasting, methods for analyzing panel microdata with a heterogeneous structure on the base of learning and machine-learning methods, financial and economic analysis.

The results obtained and their novelty: new methods for building vector autoregressive models with exogenous variables and multivariate regression models in the case of independent and Markov-switching states of economic processes, as well as methods for constructing a multivariate nonparametric regression model with independent switching states in the learning mode, designed to classify states and predict economic processes; new methodologies for analyzing economic activity and financial stability of the Belarusian economy based on statistical indicators of economic activity and financial stability developed on microdata, as well as on Markov-Switching states models with exogenous variables.

Degree of use: the results of the dissertation research are implemented and used in the Main Department of Monetary Policy and Economic Analysis and the Financial Stability Department of the National Bank of the Republic of Belarus as an additional tool for developing comprehensive measures in the field of monetary, supervisory and economic policy as well as in an educational process.

Field of application: analysis and forecasting of economic activity in the context of shocks using statistical indicators based on survey data, statistical analysis and econometric forecasting of creditworthiness and financial stability at the micro and macro levels based on the financial statements of enterprises and specified default risk criteria.