

На правах рукописи

АРБУЗОВ ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ
ФОНДОВОГО РЫНКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
И ТРАНСАКЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Пермь 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель **Андрианов Дмитрий Леонидович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Давнис Валерий Владимирович,**
доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и математических методов в экономике, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Пеникас Генрих Иозович,
кандидат экономических наук, доцент департамента прикладной экономики, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»

Защита состоится «10» мая 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ. 212.188.09 на базе ФГБОУ ВПО «Пермского национального исследовательского политехнического университета» и ФГБОУ ВПО «Пермского государственного национального исследовательского университета» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках и на сайтах ФГБОУ ВПО «Пермского национального исследовательского политехнического университета» (<http://www.pstu.ru>) и ФГБОУ ВПО «Пермского государственного национального исследовательского университета» (<http://www.psu.ru>).

Автореферат разослан «23» марта 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат экономических наук, доцент

Жуланов Е. Е.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В середине 1980-х годов появились первые работы в области рыночной микроструктуры – относительно нового направления экономики, изучающего процессы взаимодействия участников при ценообразовании финансовых активов. Само понятие микроструктуры фондового рынка является многогранным и включает в себя все процессы с их характеристиками, происходящие в краткосрочном периоде на уровне взаимодействия и заключения сделок между продавцами и покупателями; иерархию участников рынка, правила проведения и остановки торгов. В процессе своей эволюции структура фондового рынка претерпела серьезные изменения, особенно с переходом современных бирж к электронным торгам. На данный момент большинство бирж функционируют на основе механизма непрерывного двойного аукциона. Основным принцип этого механизма торгов заключается в непрерывном взаимодействии покупателей и продавцов на рынке. Такое взаимодействие приводит к возникновению значительного объема высокочастотной информации обо всех событиях в ходе торгов.

Отличительной особенностью рыночной микроструктуры является использование в исследованиях информации о динамике заявок, поступающих в двойной непрерывный аукцион, о процессах отмены заявок и о транзакциях. С развитием современных информационных технологий использование указанной информации становится доступно широкому кругу исследователей для целей конструирования имитационных моделей. Процесс развития фондового рынка и появление систем высокочастотной и алгоритмической торговли привели к существенному усложнению типологии рыночных участников, их стратегий поведения и более сложному взаимодействию между покупателями и продавцами на фондовом рынке. В свете этого имитационные модели, позволяющие учитывать сложность взаимодействия между покупателями и продавцами, а также реакцию участников на изменения правил торгов, становятся всё более востребованными.

Большинство существующих имитационных моделей фондового рынка не учитывают эмпирического поведения участников рынка (семейство моделей «*SF-ASM*»), иерархию участников фондового рынка (модели с «нулевым интеллектом»), «длинную память» в процессах отмены заявок и влияние изменения шага цены (синонимы: «размер тика» и «минимальное изменение цены») на свойства потока поступающих заявок. Для построения более качественных имитационных моделей и выявления структурных изменений при регулировании фондового рынка необходимо опираться на эмпирические данные о взаимодействии участников рынка. В связи с этим актуальной становится проблема построения имитационных моделей на основе реальных данных о торгах (в том числе и высокочастотных) с возможностью учета регулирующих воздействий на рынок.

Степень разработанности проблемы. Вопросам развития направления рыночной микроструктуры были посвящены работы: Д. Фармера, Ф. Абергеля, Ф. Лилло, А. Кайла, Д. Сорнетте, М. О'Хары, Р. Н. Мантегна, Р. Конта, В. Ю. Королева, Б. И. Алехина, В. А. Филимонова, В. Н. Пырлика, С. Стойкова, О. Бондаренко, С. В. Ивлиева, А. С. Федерякова, В. В. Науменко.

Проблемы применения подхода, при котором фондовый рынок рассматривался как стохастический процесс с определенными типами событий, имеющих статистические характеристики, изучались в работах В. Ю. Королева, С. Маслова, Д. Шаллета, М. Г. Даниелса, Д. Д. Фармера, С. Майка, Ф. Сланиной, М. Раберто, С. Цинкотти, Р. Конта, Ф. Лилло.

Проблемы выделения определенных классов участников на рынке рассматривались в работах А. А. Кириленко, А. С. Кайла, Т. Тузуна, А. Чакраборти, Е. Моро, М. Самеди, Ф. Лилло, Р. Н. Мантегна, А. С. Федерякова, А. Обижаевой.

Проблемами регулирования и моделирования фондового рынка занимались В. В. Давнис, А. И. Болвачев, Н. И. Берзон, С. Н. Смирнов, Г. И. Пеникас, А. В. Леонидов, О. Е. Кудрявцев, Ю. Н. Журавлева, А. Ю. Кузьмин, Е. А. Федорова, Е. С. Микова.

Однако проблема оценки влияния регулирования фондового рынка на взаимодействия участников в процессе ценообразования в научной среде недостаточно изучена и нуждается в дополнительных исследованиях.

В связи с этим становится востребованным расширение области исследования в сторону применения имитационных моделей, учитывающих внутреннюю иерархию участников торгов и сложные внутрисистемные взаимодействия (микроструктуру) в процессе ценообразования.

Объектом исследования является фондовый рынок, функционирующий на основе механизма двойного непрерывного аукциона.

Предметом исследования выступают экономические процессы, возникающие в результате взаимодействия участников торгов и отражаемые в высокочастотной и транзакционной информации.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является развитие экономико-математического аппарата и методов его применения к построению имитационных моделей микроструктуры фондового рынка со сложной внутренней иерархией участников торгов с использованием высокочастотной и транзакционной информации. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Развить экономико-математические подходы к построению имитационных моделей фондового рынка, учитывающих внутреннюю иерархию участников торгов и сложные внутрисистемные взаимодействия участников (микроструктуру) в процессе ценообразования.

2. Разработать спецификацию модели отмены заявок для различных классов участников торгов, которая отражает особенности не пуассоновского процесса отмен заявок для финансовых инструментов с различным минимальным изменением цены.

3. Создать программный комплекс, развивающий систему поддержки принятия решений в области регулирования правил проведения торгов на фондовом рынке, функционирующем на основе механизма двойного непрерывного аукциона.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды отечественных и зарубежных ученых. При проведении исследования были использованы методы системного анализа, статистической обработки данных, экономико-математического моделирования, агентного моделирования, численные методы, инструменты программных продуктов R, Oracle, Qt.

Информационную базу исследования составили высокочастотные и транзакционные данные о фондовой секции Московской и Сингапурской бирж за период с января 2012 по декабрь 2012 г., данные о размере минимального изменения цены, а также аналитические материалы, публикуемые в периодической печати.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Развита экономико-математические подходы к построению имитационных моделей, учитывающие внутреннюю иерархию участников торгов и микроструктуру фондового рынка, которые в отличие от существующих аналогов способны учитывать поправки в правилах проведения торгов со стороны регулятора в области изменения размера шага цены, и ограничения или предпочтения для определенного класса участников рынка (*П. 2.2 «Конструирование имитационных моделей как основы экспериментальных машинных комплексов и разработка моделей экспериментальной экономики для анализа деятельности сложных социально-экономических систем и определения эффективных направлений развития социально-экономической и финансовой сфер», глава 2, параграф 2.2, стр. 57–62, глава 3, параграфы 3.1, 3.2, стр. 94–117*).

2. Впервые разработана и обоснована спецификация модели отмены заявок для различных классов участников торгов, отражающая особенности не пуассоновского процесса отмен заявок для финансовых инструментов с различным минимальным изменением цены (*П. 1.6 «Математический анализ и моделирование процессов в финансовом секторе экономики, развитие метода финансовой математики и актуарных расчетов», глава 3, параграфы 3.1, 3.2, стр. 99–107, стр. 112–113*).

3. Создан новый программный комплекс, развивающий систему поддержки принятия решений в области регулирования процессов проведения торгов на фондовом рынке, функционирующем на основе механизма двойного непрерывного аукциона. В отличие от существующих аналогов построенный комплекс позволяет оценивать влияние регулирования на взаимодействие участников в процессе ценообразования и проводить процедуру валидации построенных моделей (*П. 2.3 «Разработка систем поддержки принятия решений для рационализации организационных структур и оптимизации управления экономикой на всех уровнях», глава 3, параграф 3.4, стр. 132–134*).

Теоретическая значимость результатов работы диссертации заключается в постановке и решении важной для экономики проблемы оценки и прогнозирования последствий регулирования фондовых рынков и разработке новых инструментов для поддержки принятия решений в области регулирования правил проведения торгов.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы регулирующими органами финансового рынка (центральными банками, денежно-кредитными управлениями, комиссиями по ценным бумагам) в рамках оценки последствий регулирования фондовых рынков, участниками финансовых рынков при принятии инвестиционных решений, инвестиционными компаниями при анализе влияния исполнения крупных заявок на возникающие трансакционные издержки. Построенная имитационная модель применена в качестве дополнительного инструмента при анализе последствий регулирования фондового рынка денежно-кредитным управлением Сингапура.

Результаты исследований автора используются при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам «Рыночная микроструктура» и «Теория риска» в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность подходов и выводов подтверждена корректным теоретическим обоснованием приведенных утверждений. Все результаты подтверждены исследованиями, проведенными с использованием высокочастотных и трансакционных данных фондовых рынков. Частные случаи использования разработанной методики объясняют эффекты и зависимости, выявленные в предыдущих работах (например, результаты исследований перехода к центам в США).

Основные результаты диссертационного исследования были представлены в виде докладов и получили положительную оценку на 6-й ежегодной международной конференции «Высокочастотные финансы и аналитика» – HF Conference 2015 (США, г. Хобокен, 2015), на международных научно-практических конференциях «R/Finance» (США, г. Чикаго, 2014, 2013), на 18-й ежегодной конференции по экономической науке с взаимодействующими гетерогенными агентами «WENIA» (Исландия, г. Рейкьявик, 2013), на 11-й ежегодной конференции риск-менеджеров «Russia Risk Conference» (г. Москва, 2015), на международном семинаре по рыночной микроструктуре и высокочастотной торговле на Сингапурском рынке акций (Сингапур, г. Сингапур, 2014), на 5-й международной конференции «EXTENT Trading Technologies Trends & Quality Assurance» (г. Санкт-Петербург, 2015), на международном семинаре по рыночной микроструктуре и высокочастотной торговле на Сингапурском рынке акций (Италия, г. Пиза, 2013), на практической конференции по алгоритмической торговле «Moscow ALGO–2014» (г. Москва, 2014), на 3-й международной

конференции «EXTENT Trading Technologies Trends & Quality Assurance» (г. Кострома, 2012), на международных конференциях Perm Winter School (г. Пермь, 2015, 2014, 2012, 2011), на Пермском конгрессе ученых-экономистов «Новая индустриализация и умная экономика: вызовы и возможности» (г. Пермь, 2015), на международных конференциях «FinMod» (г. Пермь, 2014, 2012, 2011), на региональной научно-практической конференции молодых ученых «Междисциплинарные исследования» (г. Пермь, 2013), на региональных научно-практических конференциях молодых ученых и студентов «Экономика и управление: актуальные проблемы и поиск путей решения» (г. Пермь, 2012, 2011, 2010), на научном семинаре лаборатории финансового моделирования и управления рисками (г. Пермь, 2011), на открытом городском семинаре «Perm Workshop on Applied Economic Modeling» (г. Пермь, 2014), на семинарах лаборатории конструктивных методов исследования динамических моделей (г. Пермь, 2015, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ объёмом 8,24 п. л. (личный вклад 5,89 п. л.), из них 7 работ (3,61 п. л.), отражающие основные результаты исследования, опубликованы в изданиях, входящих в список ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских и кандидатских диссертационных работ: «Вестник Пермского университета. Серия: Экономика», «Интеллект. Инновации. Инвестиции», «Управление экономическими системами: электронный научный журнал». Одна работа опубликована в издании, включенном в базу SCOPUS.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты, на которых базируется диссертация, получены лично автором. Выбор направления исследования, постановку задач, разработку методик и моделей, интерпретацию результатов соискатель выполнил совместно с научным руководителем.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 136 страницах основного машинописного текста, состоит из введения, трех глав, заключения и 8 приложений, содержит 14 рисунков, 51 формулу. Библиографический список содержит 214 наименований литературных источников, в том числе 49 отечественных, 165 зарубежных.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, ее новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены объект и предмет исследования.

В **первой главе** «Современное состояние проблемы моделирования микроструктуры фондового рынка» выполнен обзор механизмов функционирования рынков, проанализированы существующие подходы к моделированию микроструктуры, а также типология участников фондового рынка. Определены критерии для оценки качества имитационных моделей. Проанализированы методы идентификации «пузырей», систематически возникающих на фондовых рынках. Рассмотрены вопросы, связанные с

регулированием размера минимального изменения цены на рынках, а также его влиянием на микроструктуру рынка.

Во **второй главе** «Практические аспекты моделирования микроструктуры фондового рынка» приведена структура используемых данных и методы обработки этих данных. Предложена схема построения гетерогенных имитационных моделей с использованием методов идентификации и кластеризации участников рынка. Рассмотрены вопросы, связанные с процессами отмен заявок в потоке заявок. Проведен анализ ранее реализованных систем имитационного моделирования фондового рынка и выявлены основные преимущества и недостатки этих систем.

В **третьей главе** «Построение имитационной модели микроструктуры рынка» рассмотрены критерии оценки качества имитационной модели, вопросы, связанные с валидацией модели. Дано описание инструментальной реализации имитационной модели микроструктуры, приведены результаты использования данной системы моделирования для регуляторных целей. Кроме того, показана возможность использования программной реализации для оценки последствий регулирования фондового рынка.

В **заключении** приведены основные выводы, дана оценка практического значения и предложены пути дальнейшего развития имитационной модели микроструктуры фондового рынка.

II. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Развита экономико-математические подходы к построению имитационных моделей, учитывающие внутреннюю иерархию участников торгов и микроструктуру фондового рынка, которые в отличие от существующих аналогов способны учитывать поправки в правилах проведения торгов со стороны регулятора в области изменения размера шага цены, и ограничения или преференции для определенного класса участников рынка.

В настоящее время для моделирования свойств микроструктуры фондового рынка принято использовать модели «с нулевым интеллектом», которые не учитывают иерархию участников фондового рынка и ограничения, связанные с отсутствием учета возможностей регулирования фондового рынка. В ходе диссертационного исследования была разработана принципиально новая модель микроструктуры фондового рынка, которая позволила устранить указанные недостатки. В результате устранения этих недостатков удалось значительно повысить качество и точность имитационных моделей, в особенности для финансовых инструментов с большим значением шага цены. Разработанная модель

включает в себя 2 типа агентов – низкочастотные участники рынка (шумовые агенты) и высокочастотные участники рынка (HFT) (рис. 1).

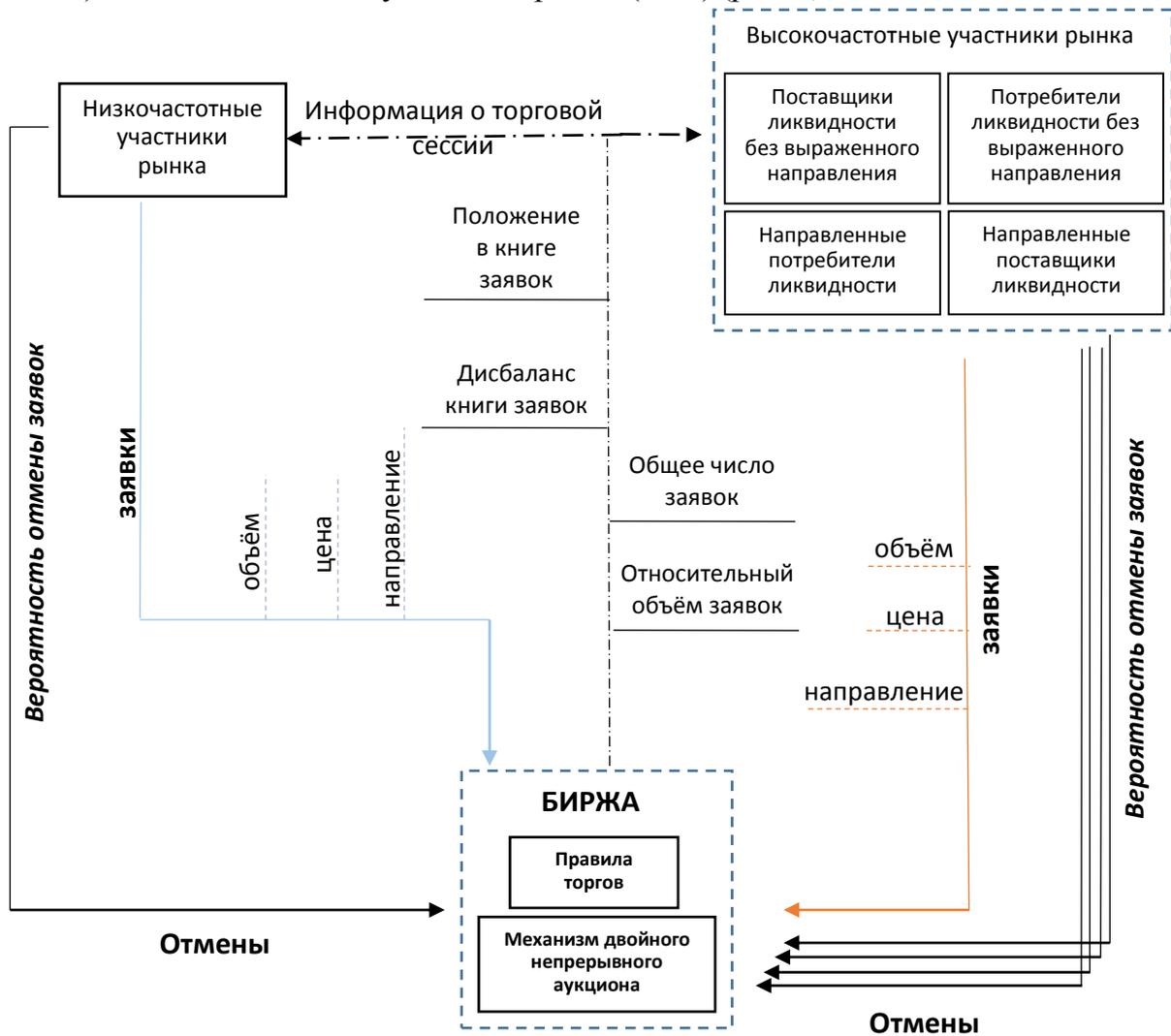


Рис. 1. Схема имитационной модели микроструктуры фондового рынка

Высокочастотные участники рынка делятся на 4 типа агентов – направленные поставщики ликвидности (участники, осуществляющие межрыночный арбитраж), направленные потребители ликвидности (алгоритмы, исполняющие крупные заявки), поставщики ликвидности без выраженного направления в торговле (маркетмейкеры), потребители ликвидности без выраженного направления в торговле (участники, осуществляющие межрыночный арбитраж). Каждый из агентов выставляет и снимает заявки на рынке. Каждая выставляемая заявка имеет направление, объем и цену. Для симуляции направления заявок использованы методики, разработанные профессором Ф. Лилло, которые позволяют воссоздавать поток заявок с длинной памятью. Автором данного исследования было предложено моделировать объем заявок с использованием степенного распределения, которое позволяет воссоздавать ситуацию прихода на рынок крупных заявок, приводящих к существенным изменениям на микроструктурном уровне. Для моделирования цены заявки рассматривалось распределение расстояния (удаленности) заявок от лучших

цен на рынке (лучшей цены покупки и лучшей цены продажи). Для каждого из агентов оцениваются параметры распределений заявок (объёма, цены и направления) и оценивается временная зависимость числа входящих заявок. Каждый участник выставляет отмены своих заявок с заданной вероятностью. Вероятность отмены заявок является условной и зависит от характеристик текущего состояния рынка:

- позиция в книге заявок;
- дисбаланс спроса и предложения;
- относительная величина заявки;
- общее число заявок на рынке.

С целью учета изменений параметров потока заявок при изменении шага цены, для каждого из рассматриваемых финансовых инструментов (более 60 инструментов) были оценены исследуемые параметры и впервые получены зависимости параметров от размера шага цены. Полученные зависимости хорошо соотносятся с наблюдаемыми на практике явлениями и взаимосвязями. В первую очередь существует степенная зависимость между показателем степени в распределении объёмов заявок и размером шага цены на рынке. Эмпирические наблюдения за поведением рынка подтверждают обнаруженную закономерность более частого прихода крупных заявок на финансовые инструменты с большим значением шага цены, при этом на рынке с малым значением шага цены крупные заявки приходят редко (рис. 2).

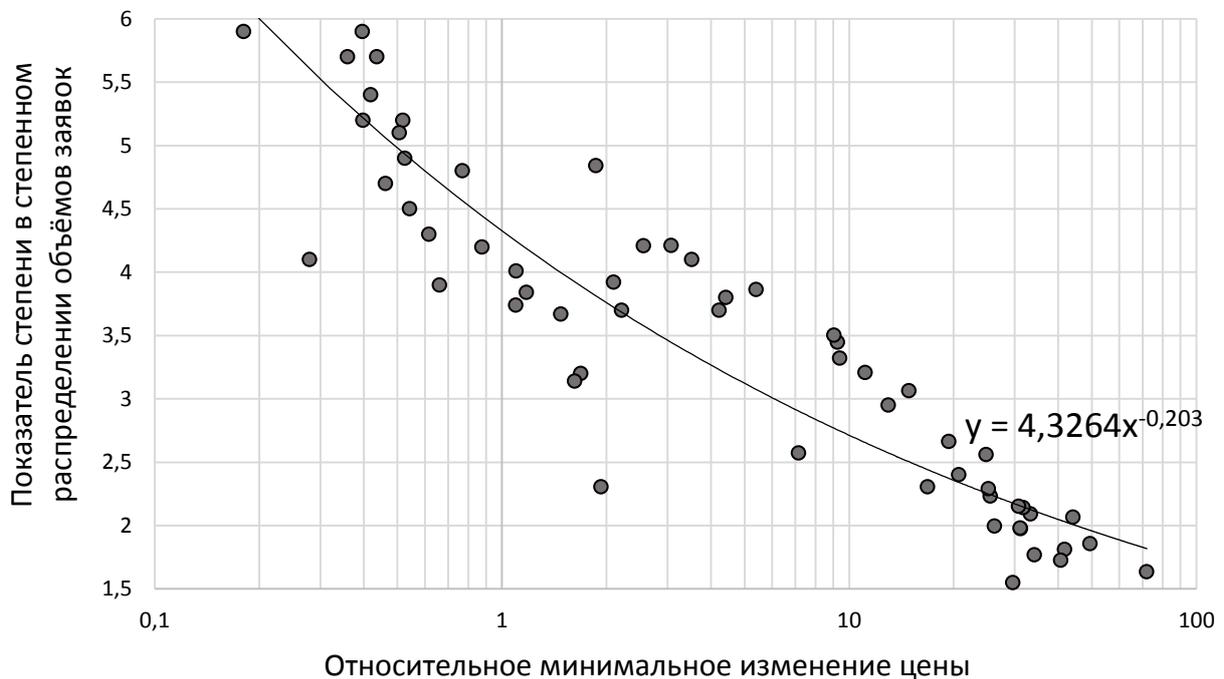


Рис. 2. Диаграмма рассеяния показателя степени в степенном распределении объёмов заявок от размера относительного шага цены (каждая точка – финансовый инструмент)

Для учета влияния размера тика на цены приходящих заявок в ходе исследования впервые было предложено разделить распределение расстояния цен заявок до лучшей цены на рынке на три части (рис. 3).

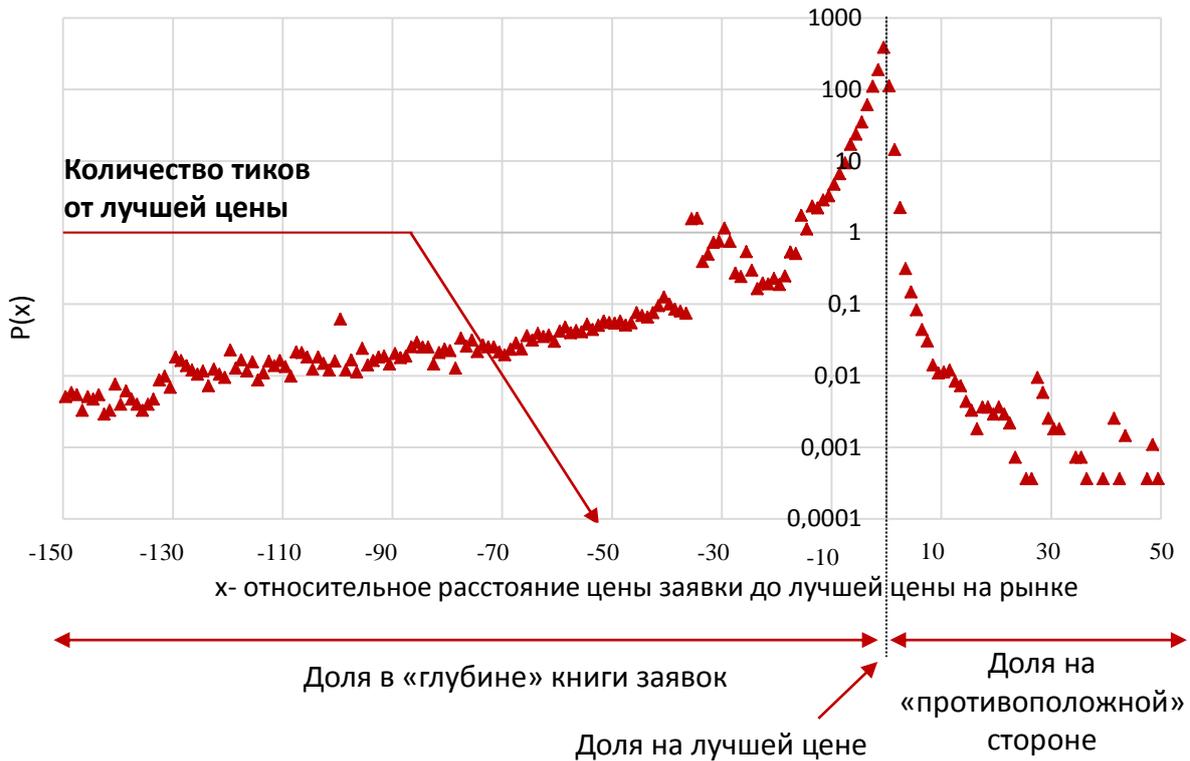


Рис. 3. Распределение расстояния цены заявки от лучших цен на рынке

Построив данное распределение более чем для 60 инструментов с высоким уровнем ликвидности и различными шагами цены, для составных частей распределения расстояния цен приходящих заявок обнаружили зависимости от размера тика (рис. 4). Данные зависимости объясняют фундаментальные различия в ценах приходящих заявок для финансовых инструментов с малым и большим значением тиков. Для заявок, приходящих на лучшую цену на рынке, показатель степени в распределении положителен. Данный факт свидетельствует о том, что с ростом размера шага цены растет и доля заявок, приходящих на уровень лучшей цены на рынке (рис. 4).

Для лимитных заявок, попадающих в книгу заявок на сторону, противоположную направлению заявки (такие заявки исполняются моментально или изменяют разницу между лучшей ценой покупки и продажи), показатель степени в степенном распределении является отрицательным. Таким образом, с увеличением размера шага цены (тика) уменьшается число сделок. Кроме того, нами ранее было обнаружено, что левая часть распределения хорошо описывается логнормальным распределением. Мы построили зависимости среднего и стандартного отклонения логнормального распределения от размера минимального изменения цены на рынке и обнаружили степенные зависимости.

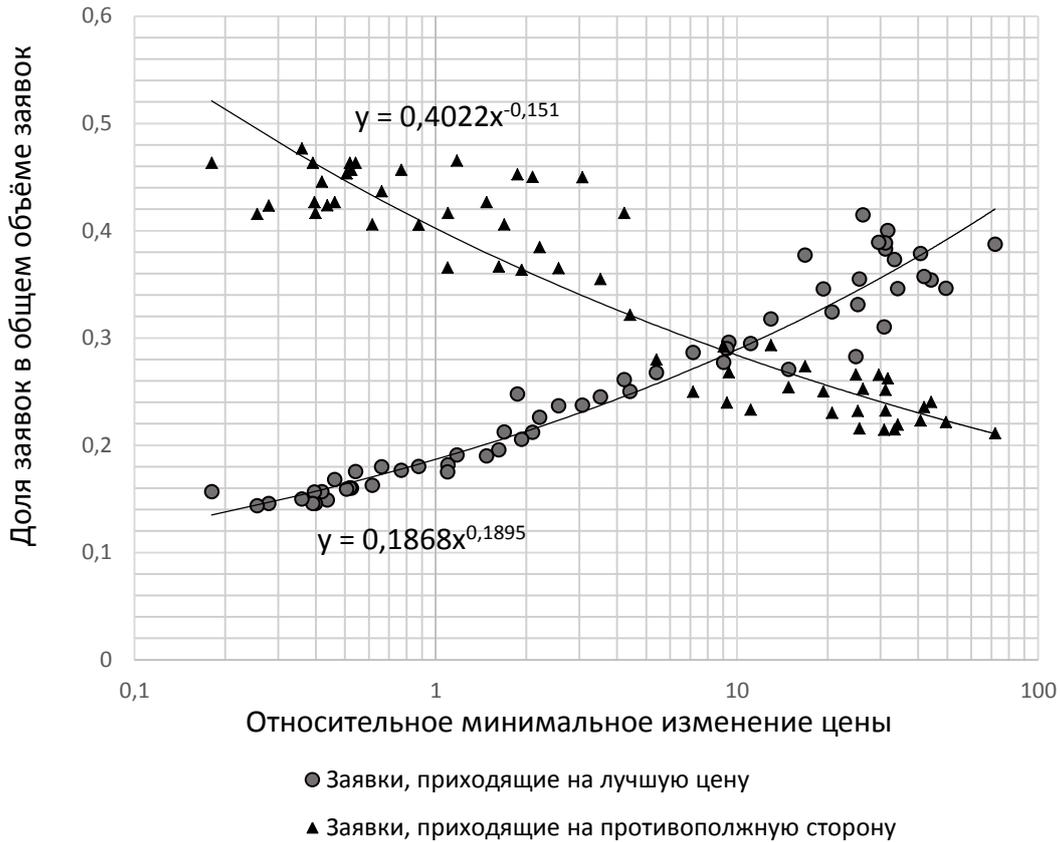


Рис. 4. Диаграмма рассеяния доли приходящих заявок от размера относительного шага цены (каждая точка – финансовый инструмент)

При увеличении размера шага цены среднее значение цены приходящих на рынок заявок уменьшается и, таким образом, на рынок начинают приходить заявки с ценой, близкой к лучшим ценам покупки и продажи (рис. 5). В случае же с уменьшением размера относительного шага цены параметр среднего в распределении увеличивается, что выражается в наполнении книги заявок в области удаленной от лучших цен спроса и предложения.

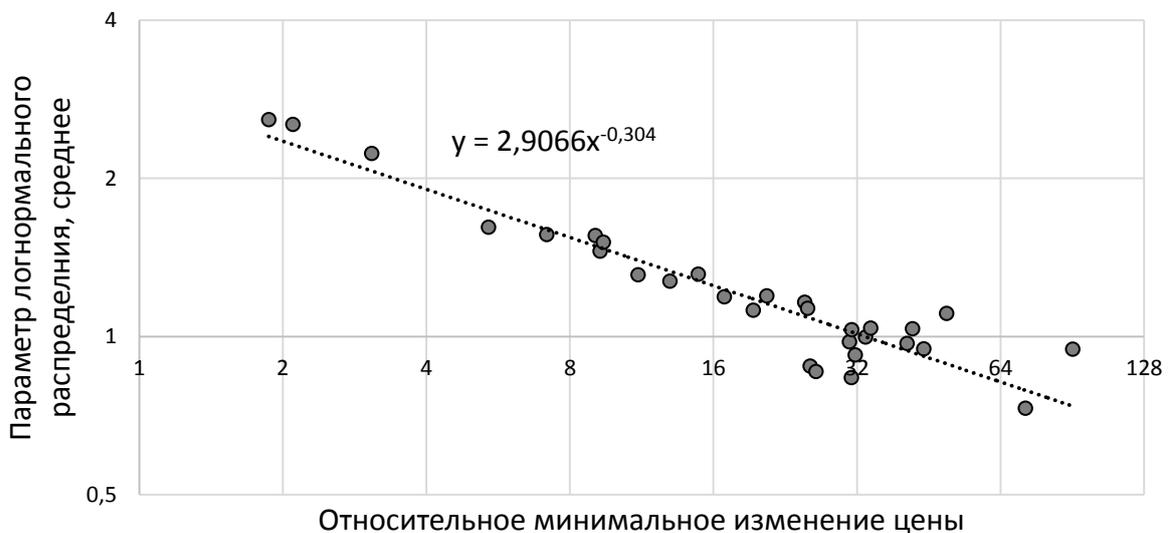


Рис. 5. Диаграмма рассеяния среднего в логнормальном распределении приходящих заявок от размера относительного тика (каждая точка – финансовый инструмент)

Анализируя зависимость стандартного отклонения логнормального распределения от уровня размера тика, можно говорить об обратной зависимости (рис. 6). При увеличении размера шага цены стандартное отклонение уменьшается, что означает консолидирование ликвидности вокруг среднего.

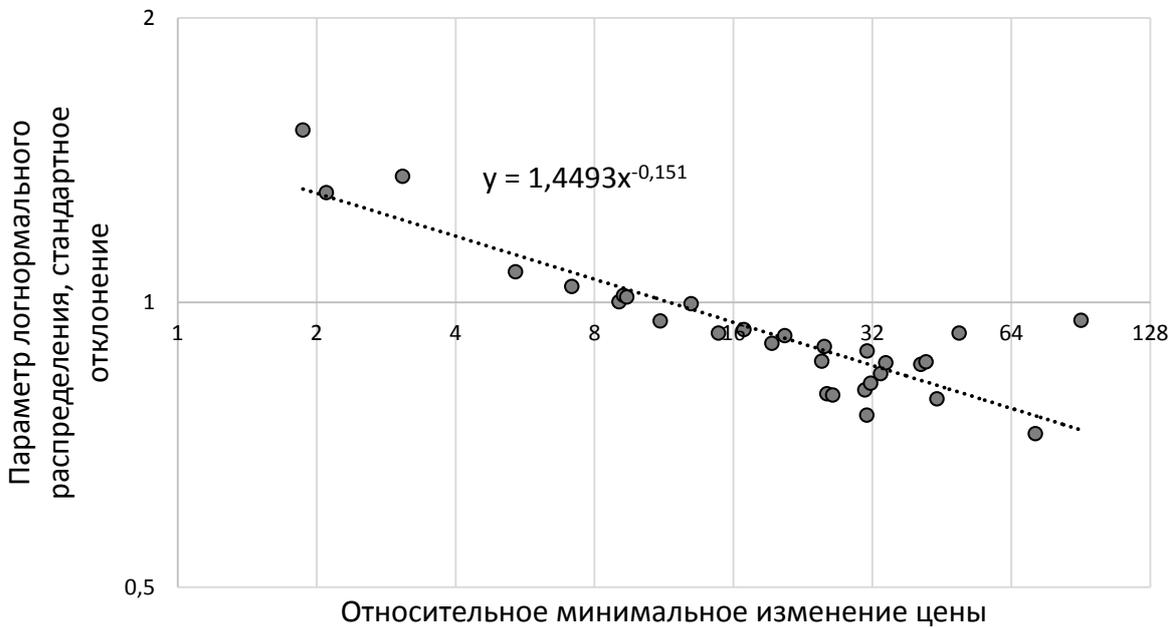


Рис. 6. Диаграмма рассеяния стандартного отклонения в логнормальном распределении входящих заявок от размера относительного шага цены (каждая точка – финансовый инструмент)

В исследовании были обнаружены зависимости параметров рынка от размера тика и предложена методика построения имитационных моделей, позволяющая учитывать последствия изменений размера тика в свойствах потока заявок. При оценке зависимостей показателей была проведена перекрестная проверка (кросс-валидация) и выявлена устойчивость в зависимостях. Данная методика может быть выражена следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = 0,94 \cdot TS^{0,2619} \\ \alpha_{volume} = 4,512 \cdot TS^{-0,238} \\ b = 0,4952 \cdot TS^{-0,368} \\ Q_{same} = 0,185 \cdot TS^{0,198} \\ Q_{opposite} = 0,416 \cdot TS^{-0,173} \\ Q_{best} = 1 - 0,416 \cdot TS^{-0,173} - 0,185 \cdot TS^{0,198} \end{array} \right.$$

где K_1 – параметр чувствительности вероятности отмены заявок к относительной позиции заявки в книге заявок;

α_{volume} – показатель степенного закона в распределении объёмов заявки, отвечающий за частоту появления заявок с крупным объёмом;

b – параметр чувствительности вероятности отмены заявки к дисбалансу в книге заявок;

Q_{same} – вероятность попадания заявки внутрь книги заявок (для заявок на покупку по цене ниже лучшей цены спроса и для заявок на продажу выше

лучшей цены предложения);

$Q_{opposite}$ – вероятность попадания заявки на противоположную сторону книги заявок (для заявок на покупку по цене выше лучшей цены спроса и для заявок на продажу ниже лучшей цены предложения);

Q_{best} – вероятность попадания заявки на лучшую цену (для заявок на покупку по цене, равной лучшей цене спроса, и для заявок на продажу по цене, равной лучшей цене предложения);

TS – величина относительного размера шага цены (тика) на рынке.

В модели также учитывается характер изменения интенсивности потока заявок в зависимости от уровня размера шага цены. В финансовой практике хорошо известен показатель, называемый среднедневной величиной торгов на рынке (ADTV). Данная характеристика показывает среднее значение объема операций, совершаемых на финансовом рынке по исследуемому инструменту. Она является довольно постоянной во времени. При этом при уменьшении размера шага цены на рынке средняя величина заявки уменьшается. Данный процесс должен вызывать изменения в интенсивности потока заявок (приводить к увеличению количества приходящих заявок). Для вычисления общего количества приходящих на рынок заявок мы используем следующее выражение:

$$n_{total} = \frac{avg(\sum_{i=1}^n volume_i)}{avg(volume_{order})},$$

где n_{total} – суммарное количество приходящих заявок;

$avg(volume_{order})$ – средний объем заявки, рассчитанный по эмпирическим данным или с использованием аппроксимирующего распределения;

$avg(\sum_{i=1}^n volume_i)$ – средний объем оборота заявок за день (в количестве акций).

После того как нами было вычислено общее количество заявок, приходящих на рынок, мы корректируем общее количество с учетом внутрисуточного паттерна. Таким образом, в ходе диссертационного исследования мы обнаружили, что с уменьшением размера шага цены:

- средний размер заявки на рынке уменьшается;
- количество сделок, происходящих на рынке, увеличивается;
- количество заявок, приходящих на уровень лучшей цены на рынке, снижается;
- общая вероятность отмены заявки увеличивается;
- вероятность отмены становится более чувствительной к ситуации на рынке.

Учет влияния размера шага цены на параметры потока заявок позволили разработать модифицированную имитационную модель, результаты которой хорошо согласуются с результатами, полученными в ходе регулирования реального рынка (например, Токийской фондовой биржи).

2. Впервые разработана и обоснована спецификация модели отмены заявок для различных классов участников торгов, отражающая особенности не пуассоновского процесса отмен заявок для финансовых инструментов с различным минимальным изменением цены.

Рассмотренная выше модель имитационного моделирования микроструктуры фондового рынка опирается на модель условной вероятности отмены заявок, предложенную С. Майком и Д. Фармером. Мы выделили наиболее значимые параметры, которые способны влиять на процесс отмены заявок на финансовом рынке:

- число заявок, находящихся в книге заявок, показывающее суммарную величину спроса и предложения на рынке, n_{tot} ;
- относительный объём заявки, показывающий степень превышения спроса или предложения на лучших ценах на рынке, v_{rel} ;
- дисбаланс спроса и предложения на рынке, n_{imb} ;
- относительная позиция заявки в книге заявок, показывающая на сколько далеко заявка отклонилась от текущих рыночных цен, y_i .

Для каждой из перечисленных характеристик была построена функция условной вероятности отмены и оценена функциональная форма такой зависимости (рис. 7–10). Для функции условной вероятности отмены в зависимости от числа заявок функциональная форма отражает тот факт, что при определенном уровне наполнения книги заявок чувствительность вероятности отмены снижается по отношению к дальнейшему наполнению книги (рис. 7).

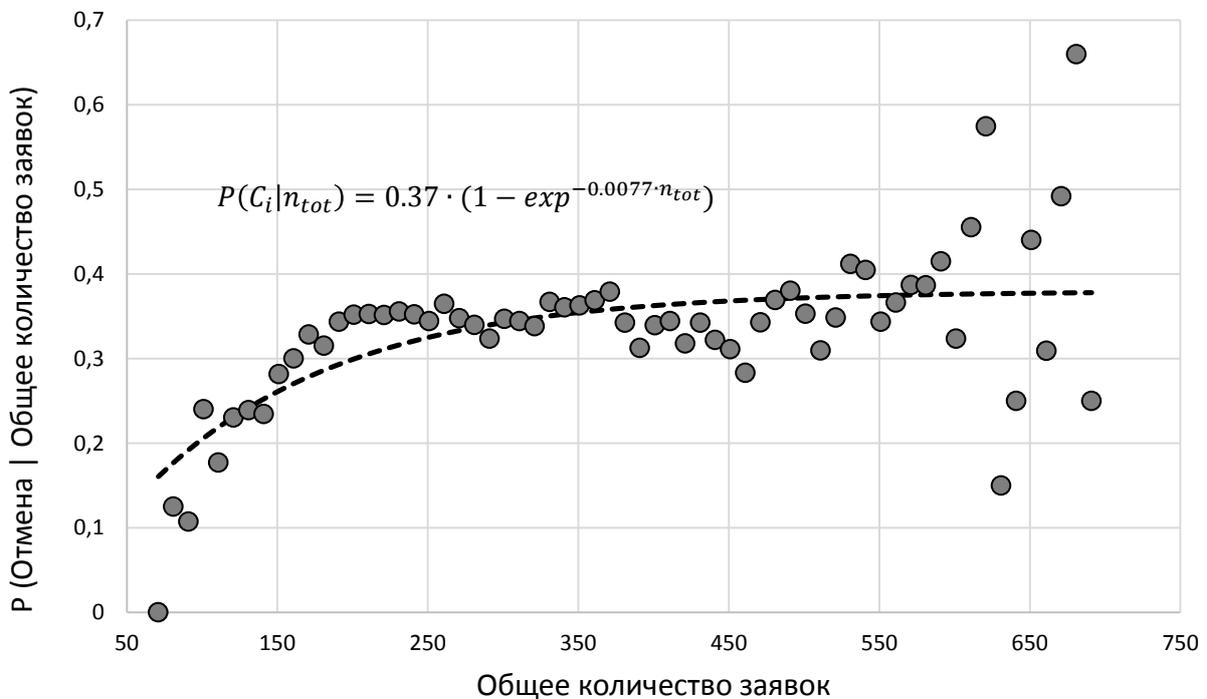


Рис. 7. Функция условной вероятности отмены заявки в зависимости от числа заявок в книге заявок (акции компании Singapore Telecommunications)

Заявки с большим значением относительного объёма имеют тенденцию к более частым отменам вследствие невозможности исполнения на рынке. Такого рода зависимости, выраженные степенной функцией, довольно часто встречаются на фондовых рынках (рис. 8).

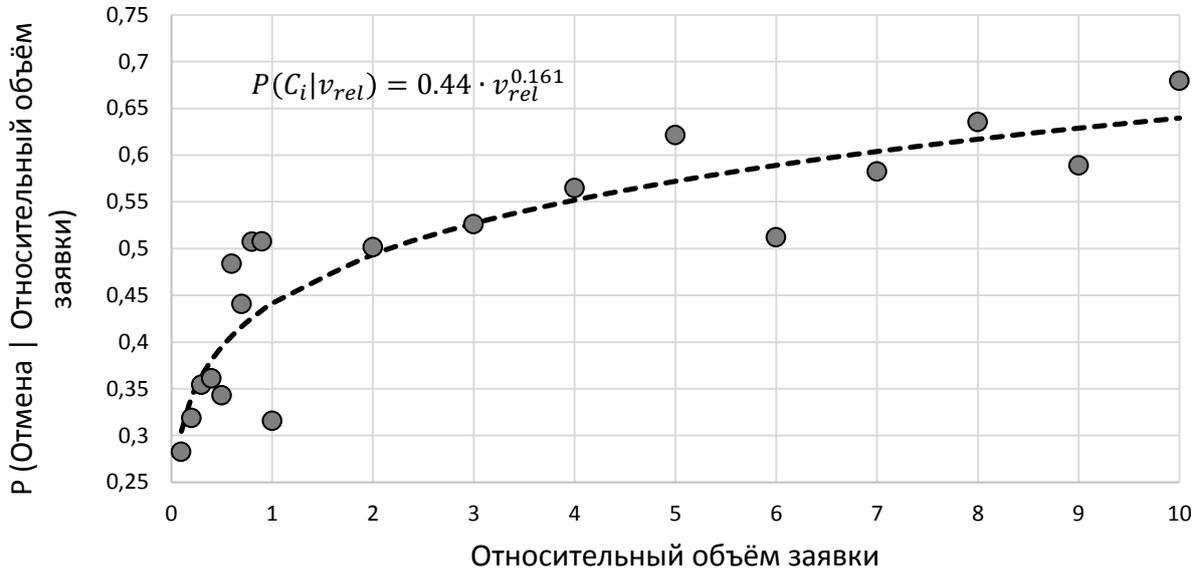


Рис. 8. Функция условной вероятности отмены заявки в зависимости от относительного объёма заявки (акции компании Singapore Telecommunications)

Заявки являются достаточно чувствительными к дисбалансу в книге заявок, и такого рода зависимости подтверждаются предыдущими исследованиями и опытом участников финансовых рынков (рис. 9).

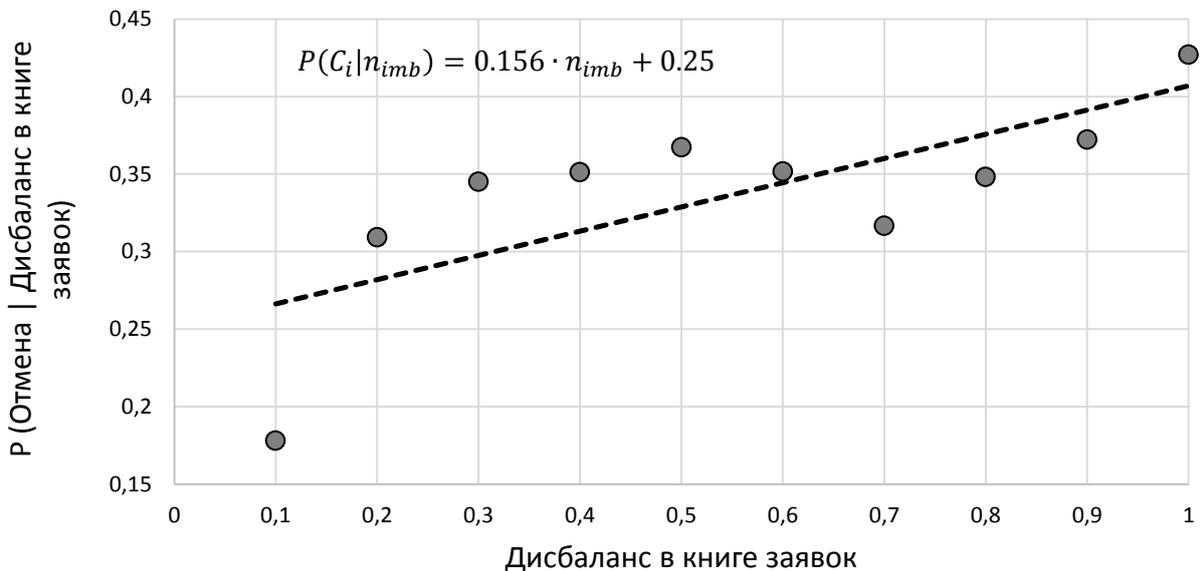


Рис. 9. Функция условной вероятности отмены заявки в зависимости от дисбаланса в книге заявок (акции компании Singapore Telecommunications)

Для функции условной вероятности отмены в зависимости от позиции заявки функциональная форма отражает тот факт, что при отдалении рыночной цены от цены заявки вероятность отмены значительно возрастает (рис. 10).

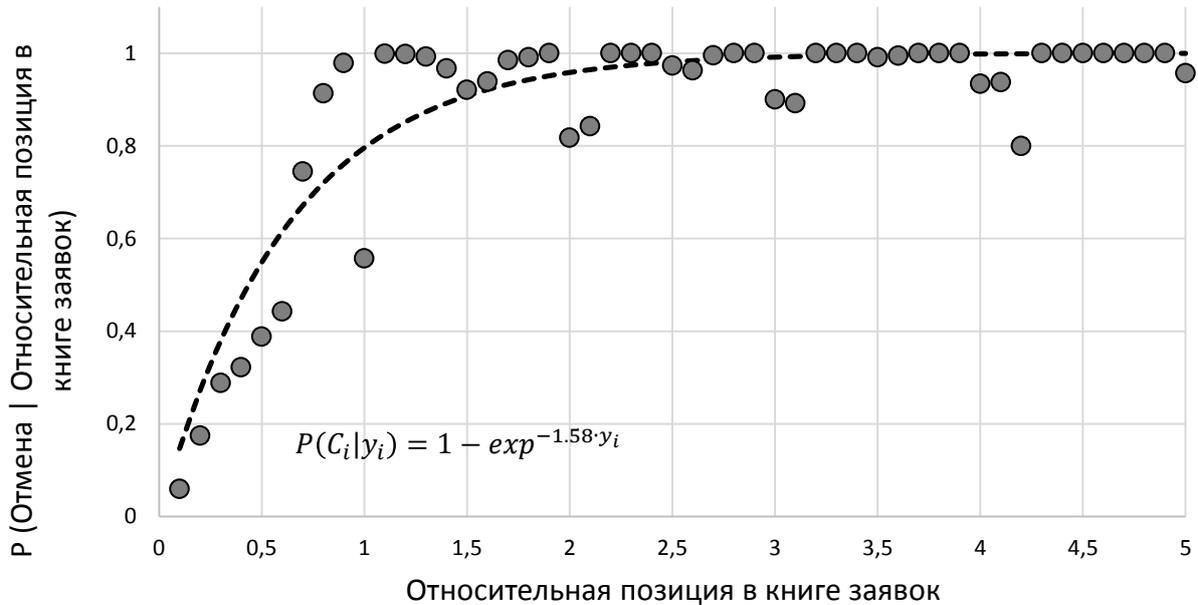


Рис. 10. Функция условной вероятности отмены заявки в зависимости от относительной позиции заявки в книге заявок (акции компании Singapore Telecommunications)

В общем виде формула условной вероятности отмены заявок выглядит следующим образом:

$$P(C_i|y_i, n_{imb}, n_{tot}, v_{rel}) = A(1 - \exp^{-K_1 \cdot y_i})(1 - \exp^{-D \cdot n_{tot}})(K_2 \cdot n_{imb} + b)v_{rel}^\alpha,$$

где $P(C_i|y_i, n_{imb}, n_{tot}, \dots)$ – условная вероятность отмены заявки;

y_i – относительная позиция заявки в книге заявок;

n_{imb} – коэффициент дисбаланса в книге заявок;

n_{tot} – общее число заявок в книге заявок;

v_{rel} – относительный объём заявки;

A – параметр, характеризующий максимальную вероятность отмены заявки;

K_1 – параметр чувствительности вероятности отмены к относительной позиции заявки в книге заявок;

D – параметр чувствительности вероятности отмены к общему числу заявок;

K_2 – параметр чувствительности вероятности отмены к дисбалансу в книге заявок;

b – параметр поправки коэффициента дисбаланса;

α – параметр чувствительности вероятности отмены к относительному объёму заявки.

При этом процесс отмены заявок в явном виде зависит не от времени, а лишь только от состояния книги заявок. Для параметров K_1 и b , участвующих в процессе отмены заявок, выявлены зависимости уровня размера шага цены на конкретном финансовом инструменте. Коэффициент K_1 отвечает за чувствительность цены заявки к текущему состоянию рынка. Из выявленной зависимости (рис. 11) следует, что с уменьшением размера тика снижается чувствительность цены заявки к текущему положению цены на рынке.

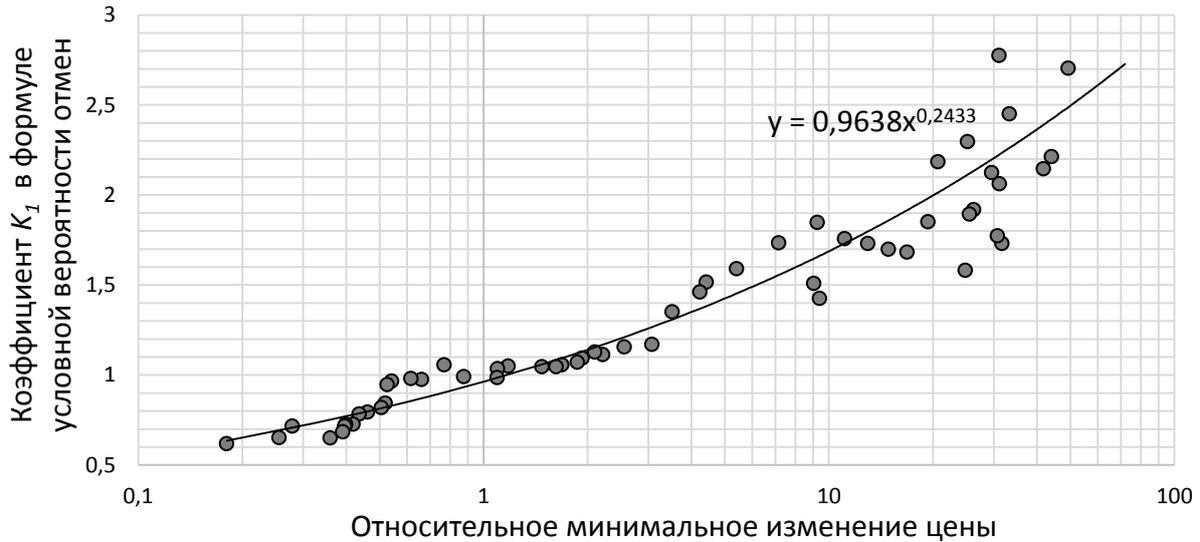


Рис. 11. Диаграмма рассеяния зависимости коэффициента K_1 условной вероятности отмен от размера относительного тика (каждая точка – финансовый инструмент)

Кроме того, для низкочастотных участников рынка была обнаружена зависимость от коэффициента b (рис. 12), который отвечает за восприимчивость участников к дисбалансу в книге заявок. При увеличении размера шага цены значение данного коэффициента снижается, что может соотноситься с ситуацией, когда участники становятся менее чувствительными к дисбалансу. В то же время при уменьшении размера тика коэффициент увеличивается и чувствительность к дисбалансу в книге заявок растет. При этом, анализируя обе зависимости, можно прийти к выводу о том, что при уменьшении размера тика общая вероятность отмены заявки увеличивается. При увеличении размера тика общая вероятность уменьшается.

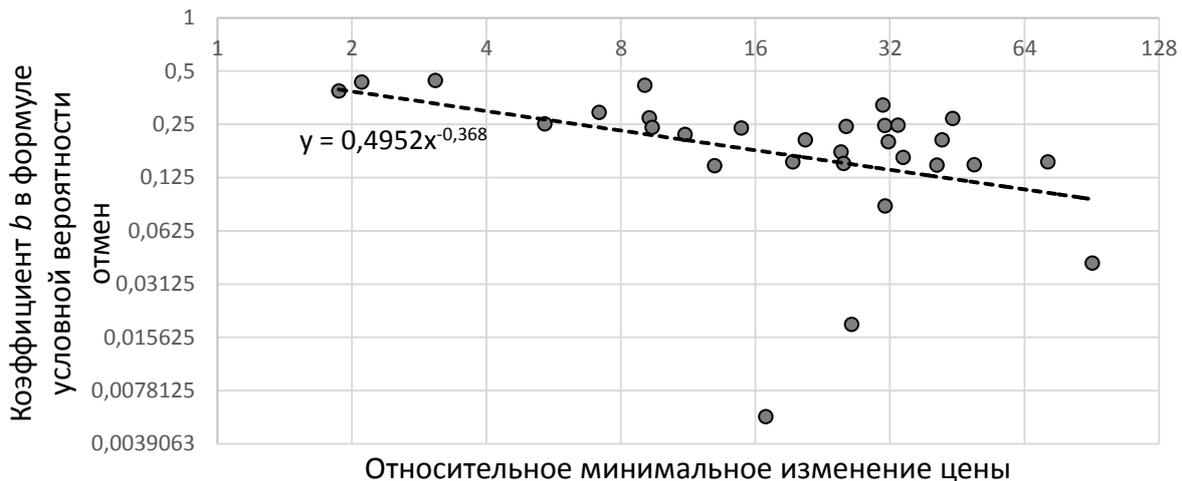


Рис. 12. Диаграмма рассеяния зависимости коэффициента b условной вероятности отмен от размера относительного тика (каждая точка – финансовый инструмент)

Для различных участников торгов проанализированы функции отмены заявок и выделены компоненты, не значимые в процессе отмены заявок (так, например, для высокочастотных участников рынка, которые являются направленными потребителями ликвидности, дисбаланс в книге заявок не значим).

3. Создан новый программный комплекс, развивающий систему поддержки принятия решений в области регулирования правил проведения торгов на фондовом рынке, функционирующем на основе механизма двойного непрерывного аукциона. В отличие от существующих аналогов построенный комплекс позволяет оценивать влияние регулирования на взаимодействие участников в процессе ценообразования и проводить процедуру валидации построенных моделей.

На основе предложенных автором экономико-математических подходов, моделей и методов разработан программный комплекс, предоставляющий инструментарий для поддержки принятия управленческих решений в области регулирования правил торгов на фондовом рынке. Программная реализация производилась на объектно-ориентированном языке C++. Для создания пользовательского интерфейса была использована среда разработки Qt – свободное программное обеспечение, позволяющее разрабатывать кросс-платформенные приложения. Апробация разработанной системы и отдельных ее модулей производилась на базе денежно-кредитного управления Сингапура. Разработанный комплекс включает в себя модуль анализа финансовых инструментов, модуль настройки имитационных моделей (рис. 13), модуль сравнения сценариев и модуль детального анализа симуляций.

В рамках рассматриваемого программного комплекса были построены имитационные модели по различным сценариям регулирования фондового рынка. В целях оценки последствий регулирования довольно часто рассматриваются 3 различных сценария (для инструментов с большим текущим значением тика) – снижение размера шага цены, увеличение HFT-активности, снижение размера шага цены и увеличение HFT активности. В качестве примера рассмотрим возможное регулирование торгов обыкновенными акциями компании Singapore Telecommunications. Данный финансовый инструмент имеет большой шаг цены (30 базисных пунктов). В первую очередь рассматривается имитационный сценарий динамики хода торгов при отсутствии изменений правил проведения торгов (сценарий без изменений). Данный сценарий должен быть сопоставим по своим количественным и качественным характеристикам с эмпирическими данными. В случае когда по сравниваемым характеристикам (объем торгов, ликвидность, волатильность и др.) отличия между различными торговыми днями эмпирических сценариев превышают или равны различиям между имитационными и эмпирическими сценариями, можно говорить о достаточно адекватном воспроизведении эмпирической микроструктуры фондового рынка. Кроме сравнения средних величин по различным сценариям по отношению к историческим данным и проведения статистических тестов на равенство средних, пользователь может выполнять сравнительный анализ при помощи усиковой диаграммы, позволяющей сравнивать сценарии, не делая при этом никаких предположений относительно распределений, лежащих в основе анализируемых характеристик.

SingTel (SingaporeTelecommunications Limited)

STEL

| Parameters | | Current Scenario Parameters | |
|--------------------------------|--------------|--|--------------|
| Tick size regulation | | | |
| price < 0.4999 | 0.0001 | Average volume of order: | 2180 |
| 0.4999 ≤ price < 0.9995 | 0.0005 | Tale exponent of orders' volume distribution: | -1.85 |
| 0.9995 ≤ price < 1.999 | 0.001 | Fraction of orders in best prices | 0.178 |
| 1.999 ≤ price < 4.998 | 0.002 | Fraction of orders in spread or opposite side of order book: | 0.418 |
| 4.998 ≤ price < 9.995 | 0.005 | Fraction of orders in the same side of order book: | 0.4 |
| 9.995 ≤ price < 49.99 | 0.01 | Mean lognormal distribution: | 1.741 |
| 49.99 ≤ price < 99.95 | 0.05 | Current price: | 3.305 |
| price ≥ 99.95 | 0.1 | Relative tick size, b.p.: | 6.05 |
| Simulations: 1 | | | |
| HFT part | | | |
| Directional liquidity provider | 2 | | |
| Directional liquidity demander | 23 | | |
| Flat liquidity provider | 2 | | |
| Flat liquidity demander | 4 | | |

Simulation name: _____ Run simulations Cancel 0%

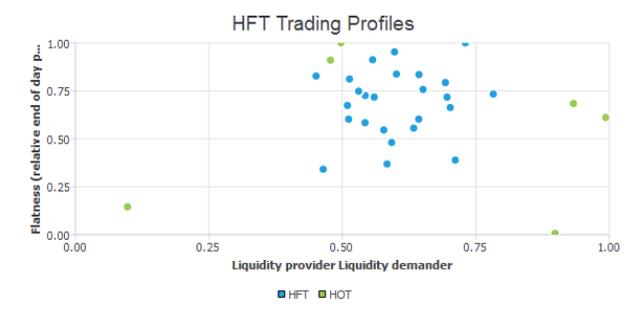
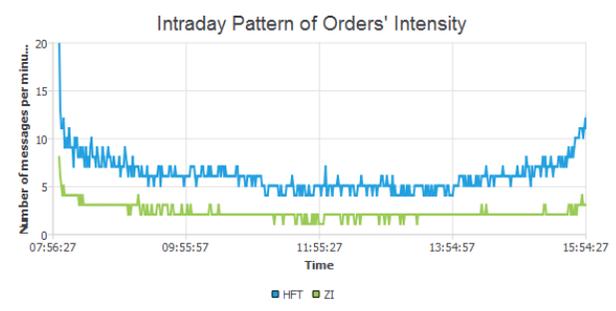
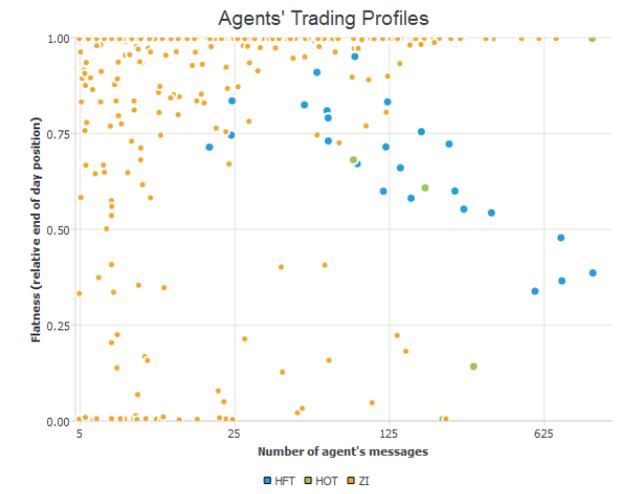
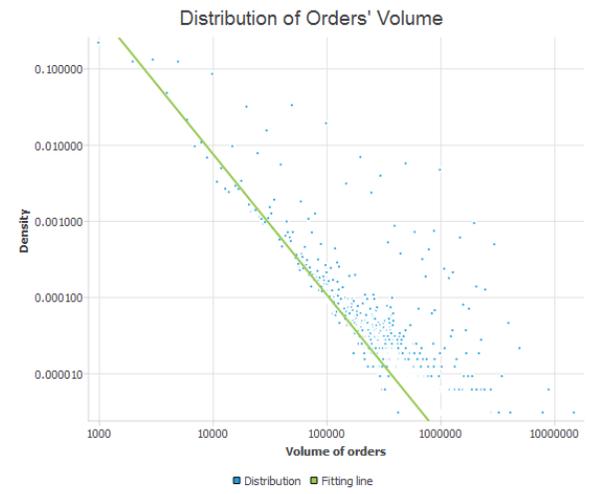


Рис. 13. Экранная форма модуля настройки имитационных моделей микроструктуры фондового рынка, разработанного программного комплекса

Нами были построены имитационные модели по различным сценариям регулирования (для каждого сценария проводилось 100 реализаций) и проанализированы характеристики для торгового объёма, количества сделок, ликвидности и волатильности. Результаты (табл. 1) содержат в себе информацию о средних значениях характеристик для каждого рассматриваемого сценария.

Таблица 1

Сравнение характеристик микроструктуры рынка по различным сценариям

| Показатель | Эмпирические значения | Сценарий без изменений | Уменьшение размера шага цены | Увеличение активности HFT | Уменьшение размера шага цены и увеличения активности HFT |
|--|-----------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|--|
| Торговый объём, млн долл. | 16,7 | 18,4 | 16,8 | 34,2 | 34,3 |
| Количество сделок, шт. | 1927 | 1927 | 2503 | 3455 | 4502 |
| Ликвидность, показатель XLM, б. п. | 33,00 | 30,32 | 44,20 | 35,00 | 30,34 |
| Ликвидность, показатель бид-аск-спред, б. п. | 31,00 | 30,32 | 6,50 | 30,20 | 6,43 |
| Волатильность, б. п. | 4,54 | 4,83 | 3,40 | 4,74 | 3,57 |

Значения в сценарии без изменений довольно близки к эмпирическим значениям, что подтверждается тестами на равенство средних. Когда происходит уменьшение размера шага цены без увеличения активности HFT, волатильность на рынке значительно снижается. В случае увеличения активности HFT волатильность незначительно снижается. Таким образом, наблюдается нелинейная зависимость показателя волатильности в различных сценариях. Подытоживая сценарный анализ моделей, можно говорить о том, что различные сценарии регулирования рынка носят в значительной степени нелинейный характер, который зависит от специфики микроструктуры конкретного финансового инструмента. Разработанный в ходе исследования программный комплекс позволяет учесть нелинейность и специфику микроструктуры при регулировании фондового рынка.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прозрачное и справедливое ценообразование долевых и долговых ценных бумаг играет важнейшую роль в развитии региональной экономики. Качество ценообразования целиком зависит от микроструктуры рынка, на котором обращаются ценные бумаги. Для эффективного регулирования рынков

необходимо понимание механизмов функционирования и возможности прогнозирования свойств рынка. В данном исследовании была решена проблема построения на основе высокочастотных и транзакционных данных имитационных моделей, которые, в отличие от существующих аналогов, способны учитывать изменения со стороны регулятора финансовых рынков (в области изменения размера шага цены и в области ограничений и предпочтений для определенного класса участников рынка). В диссертационной работе получили развитие подходы, связанные с моделированием динамики и микроструктуры финансового рынка на основе высокочастотных и транзакционных данных. Были изложены подходы к построению имитационного потока заявок, учитывающего стилизованные факты и другие закономерности высокочастотной информации. Предложен способ идентификации и кластеризации агентов на финансовом рынке для построения иерархии участников финансового рынка. Введена процедура валидации, измеряющая степень правдоподобия построенной модели. Разработана и обоснована новая спецификация модели отмены заявок для различных классов агентов, отражающая особенности отмен заявок на финансовых инструментах с различным размером шага цены. Полученные в диссертации теоретические и прикладные результаты позволяют рассматривать их как предпосылку для развития программного комплекса для анализа последствий принимаемых решений в области регулирования, таких как ограничение минимального шага цены, минимального времени жизни заявки, налога на транзакции и других мер, планируемых к применению мировыми финансовыми регуляторами, в том числе в рамках закона Додда – Франка и европейской директивы MiFID II. Развитые в диссертации экономико-математические подходы к построению имитационных моделей углубляют понимание механизмов функционирования фондового рынка и расширяют возможности прогнозирования его свойств при регулирующем воздействии. Разработанный в ходе исследования комплекс позволяет прогнозировать последствия управленческих решений для более прозрачного и справедливого ценообразования долевых и долговых ценных бумаг крупнейших промышленных предприятий Российской Федерации.

IV. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ

1. Арбузов, В. О. Адаптация модели Майка – Фармера для учета особенностей российского рынка акций / В. О. Арбузов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2014. – № 1. – С. 4–17.
2. Арбузов, В. О. К вопросу идентификации высокочастотных трейдеров на финансовом рынке / В. О. Арбузов, С. В. Ивлиев // Вестник Пермского гос. ун-та. Серия «Экономика». – 2014. – № 2. – С. 24–30.

3. Арбузов, В. О. Современные тенденции в регулировании шага цены на российском рынке акций / В. О. Арбузов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2014. – № 4 – С. 4–13.

4. Андрианов, Д. Л. Динамические модели экономики: теория, приложения, программная реализация / Д. Л. Андрианов, В. О. Арбузов, С. В. Ивлиев, В. П. Максимов, П. М. Симонов // Вестник Пермского ун-та. Серия «Экономика». – 2015. – Вып. 4. – С. 8–32.

5. Смирнов, С. И. Оценка ликвидационной стоимости крупного портфеля акций / С. И. Смирнов, В. О. Арбузов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2014. – №12(72). – URL: <http://www.uecs.ru> (дата обращения: 15. 11. 2015).

6. Andrianov, D. L. Economic dynamics models: theory, applications, computer aided implementation / D. L. Andrianov, V. O. Arbuzov, S. V. Ivliev, V. P. Maksimov, P. M. Simonov // Вестник Пермского ун-та. Серия «Экономика». – 2015. – Вып. 4. – С. 33–53.

7. Арбузов, В. О. К вопросу использования имитационных моделей финансового рынка для прогнозирования последствий регулирования минимального изменения цены / В. О. Арбузов // Вестник Пермского ун-та. Серия «Экономика». – 2014. – Вып. 4. – С. 13–23.

Статьи и научные публикации в других изданиях

8. Arbuzov, V. Revisiting of empirical zero intelligence models / V. Arbuzov // Financial Econometrics and Empirical Market Microstructure. – Heidelberg: Springer. – 2015. – P. 25–36.

9. Arbuzov, V. Market liquidity measurement and econometric modeling / V. Arbuzov, M. Frolova // Market risk and financial markets modeling. – Heidelberg: Springer. – 2012. – P. 25–37.

10. Ивлиев, С. В. Три вопроса к HFT. Как высокочастотные алгоритмы влияют на волатильность, ликвидность и рыночные шоки – взгляд сквозь призму азиатского рынка / С. В. Ивлиев, В. О. Арбузов, М. С. Фролова, В. В. Науменко // Financial One. – 2014. – № 4. – С. 72–77.

11. Арбузов, В. О. Реализация имитационной модели с нулевым интеллектом на российском финансовом рынке / В. О. Арбузов // Прогнозирование инновационного развития национальной экономики в рамках рационального природопользования: материалы II междунар. науч.-практ. конф. (13 ноября 2013 г.) / отв. ред. М. Н. Руденко. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – С. 228–234.

12. Арбузов, В. О. Агентное моделирование синхронизации финансовых рынков на основе ZI-модели с посредниками: междисциплинарные исследования / В. О. Арбузов // Сб. материалов науч.-практ. конф. (Пермь, 9–11 апреля 2013 г.) / гл. ред. Ю. А. Шарапов / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2013. – Т. 1. – С. 285.

13. Арбузов, В. О. Диагностика финансовых пузырей / В. О. Арбузов // Фьючерсы и опционы. – 2012. – № 6. – С. 74–79.

14. Арбузов, В.О. Проблемы построения многофакторных моделей прогнозирования фондового рынка / В. О. Арбузов, О. В. Ладейщикова // Труды VI Всероссийской научно-практической конференции «Импульс-2009». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 44–46.

15. Арбузов, В.О. Эмпирическая проверка информационной ценности методов технического анализа на основе критерия Колмогорова – Смирнова / В. О. Арбузов // Математические модели и системный анализ в экономике: сб. науч. тр. молодых ученых кафедры информационных систем и математических методов в экономике / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2009.

16. Арбузов, В. О. Применение модели Изинга в модели, управляемой риском / В. О. Арбузов, О. В. Ладейщикова // Сб. докладов международной научной заочной конференции «Актуальные вопросы современной экономической науки». – Липецк: Изд. центр «Де-факто», 2010. – С. 185.

17. Арбузов, В. О. Основные подходы к эмпирическому обоснованию паттернов технического анализа / В. О. Арбузов, О. В. Ладейщикова // Сб. докладов междунар. науч. заоч. конф. «Актуальные вопросы современной экономической науки». – Липецк: Изд. центр «Де-факто», 2010. – С. 187.

18. Арбузов, В. О. Имитационное моделирование рыночных крахов на основе модели Изинга / В. О. Арбузов // Материалы междунар. заоч. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые ученые о современном финансовом рынке РФ» / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2010. – С. 26.

19. Арбузов, В. О. Моделирование краха индекса РТС в 2008 г. на основе модели LPPL / В. О. Арбузов // Математические модели и системный анализ в экономике: Сб. науч. тр. молодых ученых кафедры информационных систем и математических методов в экономике / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2010. – 168 с.

20. Арбузов, В. О. Кластеризация участников рынка на основе микроструктурных данных / В. О. Арбузов, С. В. Ивлиев, М. Б. Никулин // Математические модели и системный анализ в экономике: сб. науч. тр. молодых ученых кафедры информационных систем и математических методов в экономике / Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2011.

Подписано в печать __. __. ____ г. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Типография Пермского государственного национального
исследовательского университета.

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.