

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ФИНАНСОВОГО РЫНКА
НА ОСНОВЕ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****Лукман Рафгатович УЛЯЕВ**

аспирант кафедры математических методов анализа экономики,
 Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
 lukman1992@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6496-0121>
 SPIN-код: 6767-3430

История статьи:

Получена 26.06.2019
 Получена в доработанном
 виде 15.07.2019
 Одобрена 29.07.2019
 Доступна онлайн
 30.08.2019

УДК 336.7

JEL: C58, E44, G10

Аннотация

Предмет. Агентно-ориентированное моделирование особенностей поведения финансового рынка. Основное внимание уделено способности дискретных гетерогенных агентных моделей воспроизводить эмпирические свойства реальных финансовых временных рядов, а также возможности с их помощью объяснения кризисных явлений.

Цели. Рассмотреть процесс развития агентно-ориентированных моделей финансового рынка, провести анализ дискретных гетерогенных агентных моделей, сравнить их между собой и выявить проблемы и сложности, возникающие при построении данных моделей.

Методология. Обзор существующей литературы по агентно-ориентированным моделям финансового рынка, сравнительный анализ и абстрактно-логический метод.

Результаты. Агентно-ориентированные модели были условно разделены на три основных типа: искусственные рынки, вычислительно-ориентированные имитационные модели, гетерогенные агентные модели. Рассмотрены проблемы, возникающие при построении агентно-ориентированных моделей, сформулированы некоторые открытые вопросы и возможные перспективы агентно-ориентированного моделирования финансового рынка.

Выводы. Первые два типа моделей представляют собой попытки полностью отразить все характеристики и механизмы финансового рынка. Такой подход приводит к повышенной сложности и необозримости разработанных моделей. В рамках третьего типа моделей изучаются отдельные механизмы финансового рынка на основе простых моделей, которые позволяют моделировать различные внутренние процессы взаимодействия участников финансовых отношений.

Ключевые слова:

искусственные финансовые
 рынки, вычислительно-
 ориентированные
 имитационные модели,
 гетерогенные агентные
 модели

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2019

Для цитирования: Уляев Л.Р. Изучение особенностей поведения финансового рынка на основе агентно-ориентированного моделирования // *Финансы и кредит*. — 2019. — Т. 25, № 8. — С. 1869 — 1888.
<https://doi.org/10.24891/fc.25.8.1869>

Введение

Современные агентно-ориентированные модели финансового рынка (agent-based models) на основе моделирования взаимодействий участников финансовых отношений позволяют воспроизводить сложные особенности или закономерности в работе финансовой системы и способны давать ценную информацию о различных кризисных явлениях, наблюдаемых на финансовых рынках. Они предоставляют возможность моделировать внутренние

процессы, возникающие на финансовом рынке в результате взаимодействий между участниками финансовых отношений. При этом достаточно определить поведение только отдельных агентов, а общие для всех рынков явления («стилизированные» факты (stylized facts) о волатильности или сильные падения цен на активы) возникают случайным и неожиданным образом в процессе работы искусственной системы. Таким образом, при использовании агентно-ориентированного подхода к моделированию рынка возможно

получение более общих знаний о причинах возникновения кризисных явлений на рынке.

Другой важной особенностью агентно-ориентированных моделей финансового рынка является возможность осуществлять различные модификации, путем добавления и удаления новых участников торгов и финансовых инструментов, а также изменения используемых параметров и правил поведения агентов. При этом агенты могут быть не только разнородными и взаимодействующими, но и способными адаптироваться к сложившейся ситуации на рынке исходя из собственного опыта. Они могут обучаться в искусственной системе с течением времени, использовать разнообразные формы обучения, экспериментировать с новыми идеями. Описание сложной структуры взаимодействующих агентов невозможно в рамках аналитического подхода к изучению особенностей поведения финансового рынка. В отличие от традиционных экономических моделей, использующих допущения о стабильных и саморегулирующихся рынках, при построении агентно-ориентированных моделей финансовая система рассматривается как неустойчивая система, в которой небольшие изменения могут привести к значительным и внезапным падениям цен финансовых активов. Подобное представление может служить основой для понимания различных особенностей поведения финансового рынка.

Несмотря на активное развитие агентного подхода к моделированию финансовых рынков, вопрос использования регулируемыми органами существующих моделей при принятии решений является открытым. Возникает необходимость в создании крупных масштабных моделей финансовой системы, включающих несколько различных рынков и способных служить платформой для проверки эффективности регулирующих мер и предупреждения о потенциальных проблемах в функционировании финансовых рынков. К примеру, решению данной задачи посвящен европейский исследовательский проект CRISIS (Complexity Research Initiative for Systemic Instabilities, 2011—2014), в рамках

которого строились финансовая и макроэкономическая модели Европейского союза. В результате на основе построенных моделей была разработана программная оболочка для использования регулирующими органами. Также известной попыткой создания крупномасштабной модели европейской экономики является проект Eurace (Europe Agent-based Computational Economics, 2006—2009) [1]. Однако из-за сложной природы модели проект столкнулся с определенными техническими проблемами и сложностями, поэтому полноценное моделирование экономики не было реализовано. Дальнейшая работа над симулятором была продолжена в рамках проекта SYMPHONY (2013—2016).

Данная работа посвящена описанию процесса развития агентно-ориентированных моделей финансового рынка от простых моделей с агентами с нулевым интеллектом, которые следуют произвольным эмпирическим правилам, до более сложных моделей, включающих в себя агентов с приближенными к реальности правилами поведения. Особое внимание уделяется способности агентно-ориентированных моделей финансового рынка воспроизводить эмпирические свойства реальных финансовых временных рядов, а также объяснять причины возникновения кризисных явлений на финансовом рынке. Во второй части исследования рассматриваются дискретные гетерогенные агентные модели и их различные модификации, включающие в себя различные подходы к моделированию гетерогенности, адаптации, эволюции и даже обучению агентов. В заключительной части формулируются некоторые открытые вопросы и возможные перспективы агентно-ориентированного моделирования финансового рынка.

Развитие агентно-ориентированных моделей

В последние два-три десятилетия наблюдается активный рост интереса со стороны исследователей к агентно-ориентированным моделям финансового рынка (*табл. 1*). Один из самых первых обзоров подобных моделей был сделан Б. ЛеБароном [2] в 2006 г. В данной

работе рассматривались исследования финансового рынка, проведенные на основе агентно-ориентированного подхода. Особое внимание было уделено моделям, использующим вычислительные инструменты, способные дать новое представление о неоднородной динамике поведения инвесторов при различных финансовых обстоятельствах. Также автор сконцентрировался на вопросах проектирования и разработки. Какие виды финансовых активов и инструментов будут использоваться в модели? Каким образом агенты будут получать новую информацию, определять фундаментальную стоимость активов и необходимо ли им это знание? Будут ли обучаться агенты в модели и может ли стратегия одних участников рынка зависеть от поведения других игроков? Как будет происходить ценообразование в искусственной системе? Перечисленные вопросы являются фундаментальными и чрезвычайно важными при построении агентно-ориентированных моделей финансового рынка.

Ученый Б. ЛеБарон рассматривает два типа агентно-ориентированных моделей. Первый тип включает в себя модели с трейдерами, использующими относительно небольшой фиксированный набор торговых стратегий, в основном технический или фундаментальный анализ. При этом доля агентов, использующих разные стратегии, определяется их эффективностью в прошлом. Такие модели более близки к аналитическому типу, чем к вычислительному. Второй тип содержит модели с трейдерами, использующими значительно больше разнообразных стратегий и способными к обучению в процессе моделирования работы искусственного финансового рынка (например, модель Санта-Фе (Santa Fe Artificial Stock Market)). Модели второго типа более управляемы по сравнению с моделями первого типа, в них лучше прослеживаются связи между параметрами и результатами моделирования. К тому же, агенты в подобных моделях способны создавать новые стратегии, основываясь на новых искусственно созданных данных. В моделях первого типа такая возможность не присутствует. Стоит отметить, что

способность агентов выявлять неэффективности, возникающие на финансовом рынке, сильно зависит от представления имеющейся базы данных и реализации алгоритмов обучения. Поэтому модели обоих типов имеют как сильные, так и слабые стороны, которые необходимо принимать во внимание при построении новых агентно-ориентированных моделей финансового рынка, основанных на существующих моделях.

В следующем обзоре [3] рассматриваются динамические гетерогенные агентные модели. При этом автор концентрируется на моделях, которые поддаются интерпретации, основанной на одновременном использовании аналитических и вычислительных методов. Они являются «стилизованными» и немного упрощенными версиями более сложных «искусственных рынков» (artificial markets) и вычислительно-ориентированных имитационных моделей, рассмотренных в работе Б. ЛеБарона, но при этом авторы подобных моделей также придерживаются поведенческого подхода при описании поведения гетерогенных и ограниченно рациональных агентов. Основное внимание в исследовании сосредоточено на ранних агентно-ориентированных моделях, которые включали в себя агентов, использующих технический и фундаментальный анализ при построении торговых стратегий. Такие модели способны воспроизводить широкий диапазон динамического поведения финансового рынка, начиная от стабильного и устойчивого состояния до сложной хаотической динамики. Объединение простых взаимодействий между агентами на микроуровне может создавать сложную структуру на макроуровне. Подобный подход является простым, но при этом он хорошо справляется с задачей объяснения многих «стилизованных» фактов о финансовых временных рядах, таких как избыточная волатильность, кластеризация волатильности, наличие «толстых хвостов» в распределении доходностей активов, следование за трендом, возврат к среднему, внезапные и значительные падения цен на активы. Стоит отметить, что в рассматриваемой работе было уделено внимание и некоторым примерам более сложных неустойчивых гетерогенных

агентных моделей со сложной структурой рынка и усложненными взаимодействиями между агентами в модели.

В более позднем обзоре агентно-ориентированных моделей [4] внимание авторов также сосредоточено в основном на простых гетерогенных моделях, в которых финансовые рынки рассматриваются как сложные саморазвивающиеся системы. При этом агенты являются ограниченно рациональными и принимают инвестиционные решения, используя эвристические методы прогнозирования, различные логические и эмпирические приемы. Цены и представления о будущих ценах развиваются с течением времени в результате взаимных обратных связей. Выбор стратегии определяется эволюционным отбором, поэтому агенты стремятся использовать стратегии, которые были успешны в прошлом. Также авторами обсуждается проблема калибровки гетерогенных агентных моделей и рассматриваются некоторые эксперименты с исследованием вопросов использования людьми различных эвристик при принятии инвестиционных решений в условиях неопределенности.

Авторами следующей работы [5] был сделан сравнительный обзор подходов к моделированию финансового рынка. Также они рассмотрели в общих чертах основные составляющие компоненты некоторых ранних агентно-ориентированных моделей финансового рынка [6, 7] и ряд более поздних работ, формализующих описание финансовых рынков в виде сложной системы, состоящей из множества агентов [8–10]. При этом основное внимание было уделено моделям, которые могут воспроизводить эмпирические свойства финансовых временных рядов, а также универсальные законы масштабирования, наблюдаемые на финансовых рынках. В заключение обсуждаются открытые вопросы, стоящие перед исследователями в данной области.

Критический обзор агентно-ориентированных моделей в экономике был предложен в работе [11]. Модели сравниваются с точки зрения их реалистичности и возможности интерпретации

полученных результатов моделирования. Кроме того, проводится сравнение нескольких моделей на основе анализа торговых стратегий, динамики цен и количества агентов. Отмечается, что в большинстве рассматриваемых агентно-ориентированных моделей «стилизированные» факты (stylized facts) о динамике реальных финансовых временных рядов воспроизводятся только при определенном числе агентов и в очень ограниченной области значений используемых параметров. Стоит заметить, что аналогичными недостатками обладают практически все существующие финансовые модели. В заключительной части работы авторы рассмотрели открытые вопросы и перспективы агентно-ориентированного моделирования финансовых рынков.

В обзоре [12] агентно-ориентированных моделей из эконофизики авторами были выделены три ключевых типа. Первый тип включает в себя модели, использующие двойной непрерывный встречный аукцион (order-driven market) в качестве системы проведения биржевых торгов. Работы второго типа связаны с использованием кинетической теории (kinetic theory) при построении моделей, предназначенных для объяснения определенных эмпирических фактов о распределении богатства. В качестве моделей третьего типа рассматриваются теоретико-игровые модели. В частности, особое внимание уделено классическим «играм в меньшинство» (minority games) и связанным с ними открытым проблемам. Авторами отмечается, что большинство разработчиков агентно-ориентированных моделей находятся в поисках баланса между точной и реалистичной калибровкой рассматриваемых механизмов и процессов [13] и возможностью объяснения наблюдаемых в моделях явлений [8]. В моделях первого вида хорошо воспроизводятся большинство существующих «стилизированных» фактов, но при этом процессы в модели могут быть не связаны с реальными явлениями, наблюдаемыми на финансовых рынках. Второй вид моделей включает в себя простые модели, которые обычно не могут быть откалиброваны на основе реальных данных. Попытки

использования комбинированного подхода к построению модели финансового рынка [14] обычно приводят к плохо объясняемым моделям, в которых сложно оценить чувствительность модели к отдельным параметрам.

Более разносторонний взгляд на агентно-ориентированный подход к моделированию финансовых рынков представлен в работе [15], где рассматриваются четыре первоначальных источника развития агентно-ориентированных моделей, связанных с устройством финансового рынка, клеточными автоматами, теорией игр и экспериментами с наблюдением поведения человека при принятии решений в условиях неопределенности. Автор исследует различные концепции и конструкции агентов, используемые при построении агентно-ориентированных моделей и появившиеся в результате развития рассматриваемых направлений. Исследуются ранние модели, включающие в себя простых агентов со случайным поведением и агентов с нулевым интеллектом (zero-intelligence). Также выделяются модели, где агенты запрограммированы человеком и являются самоуправляющимися, самостоятельно определяя свое поведение. В качестве третьего типа выбраны модели, в которых действия агентов наиболее подобны действиям человека на финансовом рынке: они развиваются с течением времени и подвержены различным психологическим эффектам. Автор отмечает важность выбора определенного класса поведения агентов или их совокупности и принципов взаимодействия между агентами при построении агентно-ориентированных моделей финансового рынка.

Таким образом, исходя из обзора существующих работ, агентно-ориентированные модели финансового рынка предлагается условно разделить на три основных типа: искусственные рынки (artificial markets), вычислительно-ориентированные имитационные модели, гетерогенные агентные модели (heterogeneous agent models). Первые два типа моделей представляют собой попытки полностью отразить все характеристики и механизмы финансового рынка. При этом

присутствует цель, состоящая в использовании построенных моделей на практике. Но подобный подход приводит к повышенной сложности и необозримости разработанных моделей. Безусловно, в данном направлении будут предприниматься новые шаги и строиться новые агентно-ориентированные модели финансового рынка с различными усовершенствованиями и корректировками. Однако нас интересует другой подход к проблеме объяснения различных особенностей поведения финансового рынка. В частности, изучение отдельных внутренних механизмов на финансовом рынке и исследование простых моделей, позволяющих воспроизводить различные внутренние процессы взаимодействия участников финансовых отношений. Поэтому далее будут рассмотрены модели третьего типа в дискретном времени с одним финансовым активом.

Дискретные гетерогенные агентные модели

В гетерогенных агентных моделях динамика финансового рынка возникает в результате многочисленных взаимодействий разнородных участников финансово-экономических отношений с различными поведенческими особенностями. Важнейшей составляющей подобных моделей является механизм обратной связи, состоящий в том, что решения агентов основываются на прогнозах эндогенных переменных, которые фактически определяются из ожиданий агентов. Данный процесс с течением времени приводит к совместному изменению стратегий участников торгов и цен на финансовые активы. Ранние гетерогенные агентные модели представляли собой нелинейные модели различных эндогенных процессов, наблюдаемых на реальных финансовых рынках и возникающих в результате взаимодействий разнородных агентов. Таким образом, подобные модели демонстрировали, что рыночные колебания цен на активы могут возникать эндогенно, а не в результате появления каких-либо значимых новостей. Более подробно такие модели были рассмотрены в работах [2–4, 15].

При построении гетерогенных агентных моделей по сравнению с вычислительно-

ориентированными имитационными моделями используется значительно меньше различных поведенческих правил, более упрощенные структуры взаимодействия и гораздо меньшее число параметров. Поэтому обычно подобные модели в некоторой степени являются аналитически определяемыми, в основном в рамках теории нелинейных динамических систем. Однако в отличие от вычислительно-ориентированных моделей они позволяют глубже понять основные динамические механизмы и движущие силы, наблюдаемые в модели. Тем самым они позволяют идентифицировать различные результаты работы искусственной системы в связи с действиями конкретных агентов.

В данной работе мы рассматриваем в основном аналитически определяемые модели, основанные на взаимодействии двух больших классов участников торгов на финансовом рынке, использующих технический и, соответственно, фундаментальный анализ при построении стратегии торговли. Так как агенты первого типа полагаются на экстраполяционные методы прогнозирования будущих цен, они, как правило, усиливают отклонения текущей цены от фундаментальной. Агенты второго типа, напротив, совершают сделки исходя из предположения о возврате цены к фундаментальной в долгосрочной перспективе. Взаимодействие таких двух движущих сил способно описать в упрощенном виде основной механизм колебания цен на финансовых рынках.

Гетерогенные агентные модели фокусируют внимание на эндогенной неоднородности участников торгов и играют важную роль при попытке объяснения «стилизированных» фактов и различных аномалий в реальных финансовых временных рядах. В ранних гетерогенных агентных моделях рассматривались, как правило, два основных кластера участников торгов: фундаменталисты (fundamentalists) и чартисты (chartists). В работах [16–20] авторы одними из первых показали, что взаимодействия агентов с разнородными ожиданиями может привести к нестабильности на финансовом рынке.

С помощью построенных моделей были успешно объяснены причины падений цен на активы и воспроизведены некоторые «стилизированные» факты о финансовых временных рядах.

Участники торгов на финансовом рынке могут обладать различной информацией о финансовых процессах и соответственно иметь свои собственные представления о будущей динамике финансовых активов. Они могут использовать фундаментальные данные, доступную статистику о поведении цены в прошлом, прогнозы аналитиков, текущее настроение рынка, новостные данные или любую комбинацию перечисленных наборов данных при построении торговых стратегий. Поэтому неоднородность ожиданий и адаптивное поведение оказывают значительное влияние на выбор стратегии участниками торгов и, соответственно, на динамику цен финансовых активов. К примеру, в работе [21] на основе эмпирических и экспериментальных данных представлена простая модель финансового рынка, включающая в себя фундаменталистов и участников торгов, которые выбирают стратегии исходя из текущего тренда (trend followers). Агенты второго типа могут со временем переключаться между различными стратегиями в зависимости от их эффективности, таким образом демонстрируя адаптивно-рациональное поведение. Напротив, агенты первого типа уверены в своем выборе и стараются придерживаться своей стратегии в течение всего периода симуляций. Оказывается, что даже рассматриваемой простой модели достаточно, чтобы воспроизводить сложную динамику цен финансовых активов, исследовать различные механизмы возникновения особенностей поведения финансового рынка, объяснять причины появления основных «стилизированных» фактов, таких как кластеризация волатильности и наличие длинной памяти во временных рядах волатильности.

В работе [22] объяснение основано на локальной устойчивости и теории бифуркации Хопфа. В пространстве параметров детерминированной модели вблизи границы

бифуркации Хопфа фундаментальная цена может быть локально устойчивой, но даже при малом изменении параметров могут возникать периодические колебания в окрестности фундаментальной цены. То есть совершенно внезапно стабильное состояние может смениться нестабильным. Авторы продемонстрировали, что взаимодействия между фундаменталистами и участниками торгов, следующих тренду при выборе стратегии, в результате незначительных колебаний цены актива и возникающего при этом внутреннего процесса могут привести к появлению степенного закона распределения доходностей на финансовом рынке. В исследовании [23] авторами был предложен другой поведенческий механизм для объяснения наличия длинной памяти во временных рядах волатильности. Предлагается рассматривать рынок с фиксированной долей участников торгов, использующих трендовые стратегии с наилучшей эффективностью. Показано, что при преобладании данных агентов на искусственном рынке (около 60%) модель способна воспроизводить степенное поведение индекса DAX 30. В работе [24] при оценке модели демонстрируется преобладание агентов, следующих трендовым стратегиям (около 70%). При этом они последовательно переключаются между двумя стратегиями. Подобное адаптивное поведение трейдеров приводит к появлению степенного закона. Второй базовый внутренний механизм, предложенный в работе [25], в отличие от предыдущего механизма включает в себя два локально устойчивых аттрактора с различным размером. В более раннем исследовании [21] было показано, что рассматриваемая ранее модель может отображать совместное существование локально устойчивого состояния и периодического цикла. Внутренний процесс, возникающий в результате взаимодействий участников финансовых отношений, приводит к переключению между двумя аттракторами и эндогенно генерирует кластеризацию волатильности. В дальнейшем в работе [26] были предложены условия подобного совместного существования данных аттракторов.

Традиционная финансовая литература в основном исследует роль асимметрии информации и информационной неопределенности. Однако большинство гетерогенных агентных моделей фокусируются на эндогенном рыночном механизме, возникающем в результате взаимодействия между разнородными агентами, имеющими полную информацию о фундаментальной цене рискованных финансовых активов. Представляется, что интеграция данных двух подходов может обеспечить микрооснование поведенческой неоднородности и лучшее объяснение различных аномалий на финансовых рынках. К примеру, в работе [27] авторы вводят в модель информационную неопределенность относительно фундаментальной цены актива. При этом агенты по умолчанию являются гомогенными. Но при получении новой личной информации о фундаментальной стоимости актива агенты выбирают оптимальную торговую стратегию при оптимизации ожидаемой полезности. Данный подход обеспечивает микрообоснование процесса торговли и гетерогенности среди агентов, а также предлагает новый режим переключения и выбора стратегий участниками торгов. Кроме того, в рассматриваемой работе авторами была показана способность построенной модели воспроизводить некоторые эмпирические свойства временного ряда, соответствующего индексу S&P 500: кластеризацию волатильности, длинную память во временных рядах волатильности и эффект рычага (leverage effect).

Большинство существующих гетерогенных агентных моделей используют систему дискретного выбора для демонстрации процесса переключения инвесторов между различными конкурирующими стратегиями или поведенческими правилами (например, в работе [21]). Однако такой подход позволяет моделировать изменения в процентном соотношении инвесторов, а не непосредственно потоки денежных средств. Поэтому он не подходит для отслеживания долгосрочной эффективности инвестиционных стратегий с точки зрения накопленных средств

участниками торгов или влияния денежных потоков на динамику цен. По этой причине в работе [28] была предложена новая форма переключения инвесторов между стратегиями в результате активного обучения. В отличие от пассивного обучения, когда денежные средства инвесторов накапливались естественным образом в относительно успешных стратегиях, при активном обучении фиксируется склонность инвесторов применять наиболее эффективные правила. При этом Б. ЛеБарон утверждает, что на динамику реальных рынков могут повлиять и некоторые комбинации активного и пассивного обучения, поэтому предлагается изучать их взаимодействия для лучшего понимания динамики цен на финансовые активы. В рассматриваемой работе автором была предложена простая структура, которая может одновременно учитывать динамику средств участников торгов и активный поиск новых стратегий, основанных на сравнении эффективности. Помимо воспроизведения основных «стилизированных» фактов о волатильности и объеме торгов, данная модель дает некоторое представление о динамике стратегий агентов и их влиянии на стабильную работу финансового рынка.

Новый вклад в изучение взаимодействия активного и пассивного обучения был внесен в работе [29]. Авторы построили эволюционную финансовую структуру в дискретном времени с участниками торгов, следующими трендовым стратегиям, фундаменталистами и «шумовыми» трейдерами (noise traders), совершающими сделки случайным образом. Данные агенты интерпретируются как управляющие портфелями с разными инвестиционными стилями. Инвесторы в модели могут перемещать часть своих средств между управляющими портфелями. Общий объем свободно движущегося капитала является модельным параметром, отражающим степень недоверия инвесторов. Денежные средства перераспределяются на основе относительной эффективности конкурирующих управляющих фондами в соответствии с принципом дискретного выбора. Таким образом, благосостояние портфельных менеджеров

может увеличиваться экзогенно в дополнение к эндогенному росту за счет получения дополнительной доходности с помощью заимствований. Структура данной модели представляется подходящей для изучения совместного влияния на динамику финансового рынка потоков денежных средств и различных поведенческих особенностей. В частности, авторами рассматриваемой работы было показано, что даже небольшой объем свободно движущихся средств может оказать значительное влияние на ценовые колебания активов, если инвесторы проявляют новые предубеждения в отношении оценки эффективности существующих торговых стратегий на финансовом рынке.

В работе [30] рассматривается похожая финансовая структура и исследуется совместное влияние динамики благосостояния и потоков денежных средств между конкурирующими разнородными инвестиционными фондами, которые стараются купить дешевле и продать дороже исходя из их собственной оценки справедливого значения цены на актив, таким образом стабилизируя ситуацию на финансовом рынке. В торговле активом участвуют и так называемые шумовые трейдеры, совершающие сделки случайным образом. Кредитование осуществляют банки, выдавая кредиты под залог торгуемых активов. Кроме того, в модели присутствуют инвесторы, которые вкладывают свои денежные средства в наиболее прибыльные с их точки зрения инвестиционные фонды. Авторами рассматриваемой работы было показано, что эволюционное давление, возникающее в результате краткосрочной конкуренции между инвестиционными фондами, вынуждает управляющих фондами совершать торговлю с использованием заемных средств, получаемых от банков под залог активов. В результате имитационного моделирования работы финансового рынка был выявлен новый механизм появления «толстых хвостов» в распределении доходностей актива и кластеризации волатильности, связанный с динамикой средств инвестиционных фондов и значительными падениями цен на активы, вызванными чрезмерным использованием заемных средств.

Кроме того, данная финансовая структура была использована в работе [31] для проверки различных регулирующих мер в отношении использования кредитного рычага и в работе [32] для исследования влияния различных правил управления банковским левеиджем на стабильность и свойства финансовой системы. В модели [30] банки являются фиктивными агентами с бесконечным капиталом, которые предоставляют кредиты инвестиционным фондам. Напротив, в более новых моделях банки являются ключевыми стратегическими агентами. Они зачастую используют максимально возможное кредитное плечо, корректируя его по мере необходимости, чтобы соответствовать нормативному целевому показателю. Таким образом, с помощью новых моделей воспроизводится механизм финансового кризиса 2008 г., тогда как более ранняя модель в большей степени соответствует обстоятельствам, связанным с банкротством хедж-фонда Long Term Capital Management в 1998 г.

В дальнейшем в работе [33] в рассматриваемую финансовую структуру была добавлена для банков возможность хеджирования кредитных рисков с помощью опционов. Было показано, что использование инструментов по управлению кредитными рисками участниками финансовых отношений, с одной стороны, может улучшать устойчивость финансовой системы в периоды небольших заимствований со стороны участников торгов, а с другой стороны, может увеличивать волатильность на финансовом рынке при достаточно высоком уровне заимствований в финансовой системе. В следующей статье [34] исследовался вопрос о положительном или негативном влиянии коротких продаж на ценовые колебания активов. При этом на основе построенной модели изучалось совместное влияние коротких продаж и маржинального кредитования на волатильность финансового актива при участии в торгах различных комбинаций агентов. В результате многократных контролируемых имитаций были выявлены и подробно описаны изменения в динамике цены актива при наличии в модели тех или иных агентов и

используемых финансовых инструментов. Автором отмечается особенность разработанной модели: способность воспроизводить асимметричные всплески волатильности, наблюдаемые в динамике индекса волатильности VIX (индекс рыночной волатильности Чикагской биржи опционов), который является показателем подразумеваемой волатильности индекса S&P 500. Также в рассматриваемой работе было проведено сравнение построенной агентно-ориентированной модели с эконометрическими моделями GARCH (1,1) и GJR-GARCH (1,1).

Таким образом, дискретные гетерогенные модели позволяют выявлять связи между ликвидностью, волатильностью и риском, которые практически незаметны в обычные дни на реальных финансовых рынках, поскольку они проявляются достаточно редко. С их помощью можно описывать внутренние процессы, происходящие на финансовом рынке и возникающие в результате взаимодействий между участниками финансовых отношений. Простота дискретных гетерогенных моделей с одним активом позволяет использовать инструменты теории динамических систем и полностью описать свойства искусственной финансовой системы в зависимости от используемых параметров модели. Данный подход позволяет лучше понять различные особенности поведения финансового рынка. К примеру, в рассмотренных работах были исследованы причины возникновения кризисных явлений на финансовом рынке при чрезмерных заимствованиях со стороны участников торгов, а также улучшено понимание процесса нарушения стабильной работы финансового рынка при использовании участниками финансовых отношений стандартной политики в отношении рисков, когда каждый отдельный банк пытается застраховать свои риски, например, с помощью опционов или введения ограничений на сумму выдаваемых кредитов.

Перспективы агентно-ориентированного моделирования

Представляется, что для определения перспектив моделирования финансового

рынка на основе агентного подхода следует попробовать дать ответы на следующие вопросы. Во-первых, необходимо выбрать модель для проведения исследования или построить новую финансовую структуру в соответствии с поставленными задачами и проверяемыми гипотезами. В этом вопросе не существует однозначного ответа, так как «стилизированные» факты в большинстве существующих моделей экспериментально воспроизводятся. Поэтому основной вывод состоит в том, что продвижение в данной области напрямую связано с увеличением количества и качества экспериментально воспроизводимых эмпирических свойств финансовых временных рядов. Такие изменения позволяют проводить дополнительные тесты для моделей и оценивать их качество. Однако во многих агентно-ориентированных моделях такое возможно только в очень ограниченной области значений используемых параметров и определенном числе агентов. Представляется, что динамика искусственной системы должна случайным образом воспроизводить эмпирические эффекты, наблюдаемые на финансовых рынках.

Во-вторых, необходимо определиться с числом используемых в модели параметров и агентов. Данный вопрос вызывает трудности в связи с фундаментальной проблемой соотношения количества параметров и простоты интерпретации модели. С одной стороны, минимальное количество параметров упрощает понимание работы искусственного финансового рынка. С другой стороны, даже упрощенное описание реальных рынков может потребовать использования большого количества параметров. Стоит отметить, что рассмотренные гетерогенные агентные модели в настоящее время наилучшим образом проявляют себя в этом вопросе, так как они используют упрощенные структуры взаимодействия и гораздо меньшее число параметров и поведенческих правил по сравнению с вычислительно-ориентированными моделями. При этом с их помощью можно достаточно хорошо понять и описать основные внутренние процессы, наблюдаемые в модели, а также изучить особенности

поведения искусственной системы в связи с действиями конкретных агентов.

В-третьих, важной проблемой является вопрос воспроизводимости результатов моделирования. В большинстве работ по агентно-ориентированному моделированию финансового рынка отсутствует описание данных, необходимых для программной реализации разработанных моделей. Стоит отметить, что данная проблема наблюдается и во многих других экономических исследованиях. К примеру, в работе [35] сделана попытка воспроизвести результаты 67 экономических работ, опубликованных в 13 авторитетных журналах. Авторам удалось самостоятельно проверить результаты экспериментов только 33% работ и еще 10% — с помощью авторов. Основной трудностью проверки полученных авторами результатов было отсутствие программного обеспечения или данных — даже в журналах, требующих наличия исходного кода. Представляется, что для дальнейшего развития агентно-ориентированного моделирования и построения новых теорий на основе существующих знаний должна существовать возможность проведения независимой проверки экспериментов.

Калибровка и валидация агентно-ориентированных моделей является необходимой составляющей процесса разработки модели финансового рынка. Важной особенностью агентного моделирования является возможность калибровки с использованием реальных финансовых данных и результатов различных лабораторных экспериментов с участниками торгов на финансовом рынке. На основе экспериментальных методов можно получить информацию об определенных сценариях принятия решений и выявить стратегии, которые фактически используются участниками финансово-экономических отношений при принятии решений в сложных ситуациях. Такой подход позволяет уловить различные эвристики принятия решений агентами в модели, основанной на эмпирических данных. Представляется, что использование лучших методов калибровки

и детальное структурное моделирование будут иметь существенное значение для продвижения в области агентно-ориентированного моделирования финансового рынка.

Заключение

В данной работе были рассмотрены последние разработки дискретных гетерогенных агентных моделей за последние 20 лет. Построение подобных моделей вносит значительный вклад в развитие финансовой теории и практики. Прежде всего гетерогенные агентные модели позволяют объяснять различные рыночные аномалии, наблюдаемые на финансовых рынках, а также воспроизводить внутренние процессы, возникающие в результате взаимодействий между участниками финансовых отношений и приводящие к появлению различных «стилизированных» фактов. Таким образом улучшается понимание работы финансового рынка, что в дальнейшем может помочь финансовым регуляторам принимать необходимые меры по регулированию рынка. Более того, кроме дискретных гетерогенных агентных моделей, рассмотренных в данной работе, существуют и другие направления исследований в этой области. В рамках первого направления строятся различные финансовые конструкции в непрерывном времени, которые обеспечивают унифицированную структуру для работы с историческими данными цен финансовых активов. Подобные расширенные модели могут быть применены для проверки доходности фундаментальных и других стратегий, таких как моментум (стратегия торговли по импульсу) и стратегий возврата к среднему (*mean reversion*), которые используются на практике и активно обсуждаются в теории финансов. В рамках второго направления базовая дискретная структура расширяется для рассмотрения нескольких рискованных финансовых активов, что позволяет исследовать влияние разнородных ожиданий на динамику цен, а также возможные последствия распространения нестабильности на финансовом рынке.

Все агентно-ориентированные модели, рассмотренные в данном обзоре, включают в

себя различные идеи из теории хаоса и нелинейной динамики. Связь между небольшими изменениями значений параметров и значительными макроэффектами в искусственной системе обычно бывает сложной и трудно прогнозируемой, что является особенностью и нелинейных систем. Данная проблема должна быть учтена при разработке агентно-ориентированной модели финансового рынка, а также при анализе результатов имитаций работы искусственной системы. При этом стоит отметить успешность и перспективность рассматриваемого направления исследований. Моделирование финансового рынка на основе агентов позволило решить много открытых вопросов, которые не были решены с использованием более стандартных подходов к моделированию. К тому же существует большое количество финансовых данных, доступных исследователям для тестирования построенных моделей. Многие разработчики искусственных моделей финансового рынка постепенно перешли от создания стилизованных моделей финансового рынка к построению моделей, включающих микроструктуру рынка. Они пытаются в точности воспроизвести реальные механизмы ценообразования, которые используются на современных финансовых рынках. С помощью подобных моделей возможно исследование вопросов, связанных с построением и проектированием торговых систем, а также регулированием процессов ценообразования.

Стоит отметить, что агентно-ориентированные модели хорошо подходят для тестирования поведенческих теорий. К примеру, при рассмотрении поведенческих структур они могут помочь ответить на некоторые ключевые вопросы. Во-первых, как изменятся поведенческие предубеждения при объединении всех рассматриваемых участников финансовых отношений в одну систему. Во-вторых, какие из них останутся, а какие перестанут существовать в процессе совместного существования и развития финансовой системы. Представляется, что данная связь между агентно-ориентированным подходом и поведенческими финансами станет более взаимосвязанной по мере развития рассматриваемых направлений исследований.

Таблица 1**Сравнительный анализ дискретных гетерогенных агентных моделей****Table 1****A comparative analysis of discrete time heterogeneous agent models**

Авторы	Типы агентов и возможность переключения между типами	Виды финансовых активов	«Стилизованные факты» и объяснение причин кризисных явлений	Калибровка параметров и верификация результатов
1. W.A. Brock, C.H. Hommes, 1998	Количество типов агентов ничем не ограничено; они могут переключаться между различными типами ожиданий в зависимости от доходности стратегий на исторических данных	Один рисковый актив и один безрисковый актив	Основные «стилизированные» факты в рамках модели воспроизводятся; нерегулярные колебания цен на активы вызваны преимущественно рациональным выбором, основанным на получении прибыли с использованием стратегий прогнозирования	Автокорреляционная структура цен и доходности активов в модели аналогична автокорреляционной структуре ежемесячных цен и доходностей акций IBM
2. R. Dieci et al., 2006	Рассматриваются два основных кластера участников торгов: фундаменталисты и агенты, которые выбирают стратегии исходя из текущего тренда; агенты второго типа могут переключаться между стратегиями в зависимости от их эффективности	Один рисковый актив и один безрисковый актив	Основные «стилизированные» факты в рамках модели воспроизводятся; нестабильность финансового рынка вызвана преобладанием на рынке участников торгов, использующих трендовые стратегии	Демонстрируется адаптивно-рациональное поведение участников торгов и показан эффект эволюционной адаптации; кластеры участников торгов выбраны исходя из эмпирических данных
3. X.-Z. He, Y. Li, 2007	Рассматриваются два основных кластера участников торгов: фундаменталисты и агенты, которые выбирают стратегии исходя из текущего тренда	Один рисковый актив и один безрисковый актив	Основные «стилизированные» факты в рамках модели воспроизводятся; степенные распределения доходностей активов могут возникать в результате многочисленных взаимодействий неоднородных агентов	Проводится оценка параметров модели (FI)GARCH (1,1) для ежедневных цен закрытия биржевых индексов DAX 30, FTSE 100, NIKKEI 225 и S&P 500; степенные свойства модели сравниваются с реальными данными
4. S. Thurner et al., 2012	Разнородные инвестиционные фонды (систематически покупают недооцененные активы), «шумовые» трейдеры, банки, кредитующие фонды, инвесторы, вкладывающие свои средства в наиболее прибыльные фонды	Один рисковый актив	Модель способна воспроизводить кластеризацию волатильности и «толстые хвосты» в распределении доходностей финансового актива; чрезмерное использование заимствований участниками торгов является главной причиной нестабильностей на финансовом рынке	Выбор параметров осуществлялся исходя из экономического контекста ключевых параметров с использованием эмпирических исследований; вопрос соответствия модельных данных реальным финансовым данным не рассматривается

5. C. Aymanns, J.D. Farmer, 2015	Инвесторы-банки (фундаменталисты), анализирующие исторические данные о поведении рынка, «шумовые» трейдеры	Рисковые активы	Показывается разнообразное воздействие управления банками леввериджем на динамику финансового рынка	Калибровка модели не выполняется; проверка порождаемых моделью данных на соответствие реальным финансовым временным рядам не производится
6. X.-Z. He, H. Zheng, 2016	Фундаменталисты и чартисты; присутствует информационная неопределенность относительно фундаментальной стоимости актива; при этом агенты изначально являются гомогенными; переключение происходит эндогенно, на основе личной информации и торговой стратегии	Один рисковый актив и один безрисковый актив	Модель способна воспроизводить кластеризацию волатильности, длинную память во временных рядах волатильности и эффект рычага; предлагается микрооснование механизма переключения между различными типами поведения участников торгов на финансовом рынке	Показана способность модели воспроизводить некоторые эмпирические свойства финансового временного ряда, соответствующего индексу S&P 500
7. J. Palczewski et al., 2016	Фундаменталисты, «шумовые» трейдеры и участники торгов, следующие трендовым стратегиям (управляющие портфелями с разными инвестиционными «стилями»); инвесторы перемещают свои средства между управляющими портфелями	Рисковые активы и один безрисковый актив	Инвесторы, совершая перемещение свободного капитала между управляющими портфелями, оказывают огромное влияние на динамику рынка; интенсивность выбора является движущей силой для значительного увеличения волатильности на финансовом рынке	Кластеры участников торгов выбираются исходя из эмпирических данных; вопрос соответствия калибровки модели динамике фондовых индексов на реальных финансовых рынках не рассматривается
8. Л.Р. Уляев, 2017	Разнородные инвестиционные фонды (систематически покупают недооцененные активы), «шумовые» трейдеры, банки (могут хеджировать риски с помощью опционов), инвесторы, вкладывающие свои средства в наиболее прибыльные фонды	Один рисковый актив	Модель способна воспроизводить кластеризацию волатильности и «толстые хвосты» в распределении доходностей; использование инструментов по управлению кредитными рисками участниками финансовых отношений может как увеличивать, так и уменьшать волатильность на финансовом рынке; описываются механизмы возникновения кризисных явлений на финансовом рынке	Выбор параметров осуществлялся в результате тестирования различных значений и исходя из экономического контекста ключевых параметров; вопрос соответствия порождаемых моделью данных динамике реальных финансовых рынков не рассматривается

9. Л.Р. Уляев, 2018	Разнородные инвестиционные фонды (систематически покупают и продают активы), «шумовые» трейдеры, банки (выдают кредиты инвестиционным фондам под залог финансовых активов), инвесторы (вкладывают свои средства в наиболее прибыльные с их точки зрения инвестиционные фонды)	Один рисковый актив	Основные «стилизированные факты» в рамках модели воспроизводятся; на основе модели исследуется совместное влияние коротких продаж и требований банков по погашению задолженностей на ценовые колебания торгуемого актива при различных комбинациях агентов; описываются механизмы возникновения кризисных явлений на финансовом рынке	Модель способна воспроизводить асимметричные всплески волатильности, наблюдаемые в динамике индекса волатильности VIX (показатель подразумеваемой волатильности индекса S&P 500); проводится сравнение модели с GARCH (1,1) и GJR-GARCH (1,1)
---------------------	---	---------------------	---	---

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. *Deissenberg C., van der Hoog S., Dawid H.* EURACE: A Massively Parallel Agent-Based Model of the European Economy. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, vol. 204, iss. 2, pp. 541–552. URL: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.116>
2. *LeBaron B.* Agent-Based Computational Finance. In: *Handbook of Computational Economics*. Elsevier, 2006, vol. 2, pp. 1187–1232. URL: [https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02024-1](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02024-1)
3. *Hommes C.H.* Heterogeneous Agent Models in Economics and Finance. In: *Handbook of Computational Economics*. Elsevier, 2006, vol. 2, pp. 1109–1186.
4. *Hommes C., Wagener F.* Complex Evolutionary Systems in Behavioral Finance. In: Hens T., Schenk-Hoppe K.R. (eds) *Handbook of Financial Markets: Dynamics and Evolution*. Amsterdam, Elsevier, 2009, pp. 217–276. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-012374258-2.50008-7>
5. *Samanidou E., Zschischang E., Stauffer D., Lux T.* Agent-Based Models of Financial Markets. *Reports on Progress in Physics*, 2007, vol. 70, no. 3, pp. 409–450. URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/3/R03>
6. *Kim G., Markowitz H.M.* Investment Rules, Margin and Market Volatility. *Journal of Portfolio Management*, 1989, vol. 16, iss. 1, pp. 45–52. URL: <https://doi.org/10.3905/jpm.1989.409233>
7. *Levy M., Levy H., Solomon S.* A Microscopic Model of the Stock Market: Cycles, Booms, and Crashes. *Economic Letters*, 1994, vol. 45, iss. 1, pp. 103–111. URL: [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(94)90065-5)
8. *Cont R., Bouchaud J.P.* Herd Behavior and Aggregate Fluctuations in Financial Markets. *Macroeconomic Dynamics*, 2000, vol. 4, iss. 2, pp. 170–196. URL: <https://doi.org/10.1017/S1365100500015029>
9. *Huang Z.F., Solomon S.* Power, Levy, Exponential and Gaussian-like Regimes in Auto Catalytic Financial Systems. *The European Physical Journal B*, 2001, vol. 20, iss. 4, pp. 601–607. URL: <https://doi.org/10.1007/PL00011114>

10. Lux T., Marchesi M. Scaling and Criticality in a Stochastic Multi-Agent Model of a Financial Market. *Nature*, 1999, vol. 397, pp. 498–500. URL: <https://doi.org/10.1038/17290>
11. Cristelli M., Pietronero L., Zaccaria A. Critical Overview of Agent-Based Models for Economics. Proceedings of the School of Physics E. Fermi. Varenna, Course CLXXVI, 2010, pp. 128–154. URL: <https://arxiv.org/abs/1101.1847>
12. Chakraborti A., Toke I.M., Patriarca M., Abergel F. Econophysics Review: II. Agent-based Models. *Quantitative Finance*, 2011, vol. 11, iss. 7, pp. 1013–1041. URL: <https://dx.doi.org/10.1080/14697688.2010.539249>
13. Mike S., Farmer J.D. An Empirical Behavioral Model of Liquidity and Volatility. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2008, vol. 32, iss. 1, pp. 200–234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2007.01.025>
14. Lux T., Marchesi M. Volatility Clustering in Financial Markets. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 2000, vol. 3, no. 4, pp. 675–702. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219024900000826>
15. Chen S.-H. Varieties of Agents in Agent-Based Computational Economics: A Historical and an Interdisciplinary Perspective. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2012, vol. 36, iss. 1, pp. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2011.09.003>
16. Day R.H., Huang W. Bulls, Bears and Market Sheep. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1990, vol. 14, iss. 3, pp. 299–329. URL: [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(90\)90061-H](https://doi.org/10.1016/0167-2681(90)90061-H)
17. Chiarella C. The Dynamics of Speculative Behaviour. *Annals of Operations Research*, 1992, vol. 37, iss.1, pp. 101–123. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02071051>
18. Lux T. Herd Behaviour, Bubbles and Crashes. *The Economic Journal*, 1995, vol. 105, iss. 431, pp. 881–896. URL: <https://doi.org/10.2307/2235156>
19. Brock W.A., Hommes C.H. A Rational Route to Randomness. *Econometrica*, 1997, vol. 65, no. 5, pp. 1059–1095. URL: <https://doi.org/10.2307/2171879>
20. Brock W.A., Hommes C.H. Heterogeneous Beliefs and Routes to Chaos in a Simple Asset Pricing Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1998, vol. 22, iss. 8-9, pp. 1235–1274. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(98\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(98)00011-6)
21. Dieci R., Foroni I., Gardini L., He X.-Z. Market Mood, Adaptive Beliefs and Asset Price Dynamics. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2006, vol. 29, iss. 3, pp. 520–534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.065>
22. He X.-Z., Li Y. Power Law Behaviour, Heterogeneity, and Trend Chasing. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2007, vol. 31, iss. 10, pp. 3396–3426. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2006.11.008>
23. He X.-Z., Li Y. Testing of a Market Fraction Model and Power-Law Behaviour in the DAX 30. *Journal of Empirical Finance*, 2015, vol. 31, pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jempfin.2015.01.001>
24. He X.-Z., Li Y. The Adaptiveness in Stock Markets: Testing the Stylized Facts in the DAX 30. *Journal of Evolutionary Economics*, 2017, vol. 27, iss. 5, pp. 1071–1094. URL: <https://doi.org/10.1007/s00191-017-0505-9>

25. Gaunersdorfer A., Hommes C.H., Wagener F.O.O. Bifurcation Routes to Volatility Clustering under Evolutionary Learning. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2008, vol. 67, iss. 1, pp. 27–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2007.07.004>
26. He X.-Z., Li K., Wang C. Volatility Clustering: A Nonlinear Theoretical Approach. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2016, vol. 130, pp. 274–297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.07.020>
27. He X.-Z., Zheng H. Trading Heterogeneity under Information Uncertainty. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2016, vol. 130, pp. 64–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.07.001>
28. LeBaron B. Active and Passive Learning in Agent-Based Financial Markets. *Eastern Economic Journal*, 2011, vol. 37, iss. 1, pp. 35–43. URL: <https://doi.org/10.1057/eej.2010.53>
29. Palczewski J., Schenk-Hopp K.R., Wang T. Itchy Feet vs Cool Heads: Flow of Funds in an Agent-Based Financial Market. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2016, vol. 63, pp. 53–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2015.12.002>
30. Thurner S., Farmer J., Geanakoplos J. Leverage Causes Fat Tails and Clustered Volatility. *Quantitative Finance*, 2012, vol. 12, iss. 5, pp. 695–707. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/14697688.2012.674301>
31. Poledna S., Thurner S., Farmer J.D., Geanakoplos J. Leverage-Induced Systemic Risk under Basle II and Other Credit Risk Policies. *Journal of Banking and Finance*, 2014, vol. 42, pp. 199–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2014.01.038>
32. Aymanns C., Farmer J.D. The Dynamics of the Leverage Cycle. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 50, pp. 155–179. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2014.09.015>
33. Уляев Л.Р. Моделирование влияния инструментов управления индивидуальными рисками на волатильность финансовых активов // Аудит и финансовый анализ. 2017. № 5-6. С. 653–659.
34. Уляев Л.Р. Моделирование влияния коротких продаж на волатильность финансового рынка на основе агентно-ориентированного подхода // Интеллект, инновации, инвестиции. 2018. № 7. С. 51–60.
35. Chang A.C., Li P. Is Economics Research Replicable? Sixty Published Papers from Thirteen Journals Say “Usually Not”. Finance and Economics Discussion Series 2015-083. Washington, Board of Governors of the Federal Reserve System, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.17016/FEDS.2015.083>

Информация о конфликте интересов

Я, автор данной статьи, со всей ответственностью заявляю о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

**A STUDY INTO DISTINCTIONS OF THE FINANCIAL MARKET BEHAVIOR
THROUGH AGENT-BASED MODEL****Lukman R. ULYAEV**Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russian Federation
lukman1992@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6496-0121>**Article history:**Received 26 June 2019
Received in revised form
15 July 2019
Accepted 29 July 2019
Available online
30 August 2019**JEL classification:** C58, E44,
G10**Keywords:** artificial financial
market, computer simulation,
heterogeneous agent-based
model**Abstract****Subject** The article discusses agent-based modeling of the financial market behavior. I scrutinize whether discrete heterogeneous agent-based models can reproduce empirical qualities of real financial time series and their capabilities for explaining crisis phenomena.**Objectives** The research reviews the development of agent-based models of financial markets, analyzes discrete heterogeneous agent-based models, compare them and identify challenging aspects arising from the construction of the models.**Methods** The research overviews the existing literature on agent-based models of financial market, represents a comparative analysis and abstraction-logic method.**Results** Agent-based models were conditionally classified into three types, i.e. artificial markets, computer simulation, heterogeneous agent-based models. The article focuses on issues arising from agent-based models, poses some questions and outlines the future of agent-based modeling of financial market.**Conclusions and Relevance** The first two types of models attempt to give a full view of the financial market characteristics and mechanisms. This complicates the models and makes them less foreseeable. As part of the third model, some mechanisms of the financial market are studied through simple models, which help model different internal processes that take place in financial relationships.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2019

Please cite this article as: Ulyayev L.R. A Study into Distinctions of the Financial Market Behavior Through Agent-Based Model. *Finance and Credit*, 2019, vol. 25, iss. 8, pp. 1869–1888.
<https://doi.org/10.24891/fc.25.8.1869>**References**

1. Deissenberg C., van der Hoog S., Dawid H. EURACE: A Massively Parallel Agent-Based Model of the European Economy. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, vol. 204, iss. 2, pp. 541–552. URL: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.116>
2. LeBaron B. Agent-Based Computational Finance Vol. 2. In: *Handbook of Computational Economics*. Elsevier, 2006, pp. 1187–1232. URL: [https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02024-1](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02024-1)
3. Hommes C.H. Heterogeneous Agent Models in Economics and Finance. In: *Handbook of Computational Economics*. Vol. 2. Elsevier, 2006, pp. 1109–1186. URL: [https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02023-X](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02023-X)
4. Hommes C., Wagener F. Complex Evolutionary Systems in Behavioral Finance. In: Hens T., Schenk-Hoppe K.R. (eds) *Handbook of Financial Markets: Dynamics and Evolution*. Amsterdam, Elsevier, 2009, pp. 217–276. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-012374258-2.50008-7>
5. Samanidou E., Zschischang E., Stauffer D., Lux T. Agent-Based Models of Financial Markets. *Reports on Progress in Physics*, 2007, vol. 70, no. 3, pp. 409–450. URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/70/3/R03>

6. Kim G., Markowitz H.M. Investment Rules, Margin and Market Volatility. *Journal of Portfolio Management*, 1989, vol. 16, iss. 1, pp. 45–52. URL: <https://doi.org/10.3905/jpm.1989.409233>
7. Levy M., Levy H., Solomon S. A Microscopic Model of the Stock Market: Cycles, Booms, and Crashes. *Economic Letters*, 1994, vol. 45, iss. 1, pp. 103–111. URL: [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(94)90065-5)
8. Cont R., Bouchaud J.P. Herd Behavior and Aggregate Fluctuations in Financial Markets. *Macroeconomic Dynamics*, 2000, vol. 4, iss. 2, pp. 170–196. URL: <https://doi.org/10.1017/S1365100500015029>
9. Huang Z.F., Solomon S. Power, Levy, Exponential and Gaussian-like Regimes in Auto Catalytic Financial Systems. *The European Physical Journal B*, 2001, vol. 20, iss. 4, pp. 601–607. URL: <https://doi.org/10.1007/PL00011114>
10. Lux T., Marchesi M. Scaling and Criticality in a Stochastic Multi-Agent Model of a Financial Market. *Nature*, 1999, vol. 397, pp. 498–500. URL: <https://doi.org/10.1038/17290>
11. Cristelli M., Pietronero L., Zaccaria A. Critical Overview of Agent-Based Models for Economics. *Proceedings of the School of Physics E. Fermi. Varenna, Course CLXXVI*, 2010, pp. 128–154. URL: <https://arxiv.org/abs/1101.1847>
12. Chakraborti A., Toke I.M., Patriarca M., Abergel F. Econophysics Review: II. Agent-Based Models. *Quantitative Finance*, 2011, vol. 11, iss. 7, pp. 1013–1041. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/14697688.2010.539249>
13. Mike S., Farmer J.D. An Empirical Behavioral Model of Liquidity and Volatility. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2008, vol. 32, iss. 1, pp. 200–234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2007.01.025>
14. Lux T., Marchesi M. Volatility Clustering in Financial Markets. *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 2000, vol. 3, no. 4, pp. 675–702. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219024900000826>
15. Chen S.-H. Varieties of Agents in Agent-Based Computational Economics: A Historical and an Interdisciplinary Perspective. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2012, vol. 36, iss. 1, pp. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2011.09.003>
16. Day R.H., Huang W. Bulls, Bears and Market Sheep. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1990, vol. 14, iss. 3, pp. 299–329. URL: [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(90\)90061-H](https://doi.org/10.1016/0167-2681(90)90061-H)
17. Chiarella C. The Dynamics of Speculative Behaviour. *Annals of Operations Research*, 1992, vol. 37, iss.1, pp. 101–123. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02071051>
18. Lux T. Herd Behaviour, Bubbles and Crashes. *The Economic Journal*, 1995, vol. 105, iss. 431, pp. 881–896. URL: <https://doi.org/10.2307/2235156>
19. Brock W.A., Hommes C.H. A Rational Route to Randomness. *Econometrica*, 1997, vol. 65, no. 5, pp. 1059–1095. URL: <https://doi.org/10.2307/2171879>
20. Brock W.A., Hommes C.H. Heterogeneous Beliefs and Routes to Chaos in a Simple Asset Pricing Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1998, vol. 22, iss. 8-9, pp. 1235–1274. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(98\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(98)00011-6)

21. Dieci R., Foroni I., Gardini L., He X.-Z. Market Mood, Adaptive Beliefs and Asset Price Dynamics. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2006, vol. 29, iss. 3, pp. 520–534.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.065>
22. He X.-Z., Li Y. Power Law Behaviour, Heterogeneity, and Trend Chasing. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2007, vol. 31, iss. 10, pp. 3396–3426.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2006.11.008>
23. He X.-Z., Li Y. Testing of a Market Fraction Model and Power-Law Behaviour in the DAX 30. *Journal of Empirical Finance*, 2015, vol. 31, pp. 1–17.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jempfin.2015.01.001>
24. He X.-Z., Li Y. The Adaptiveness in Stock Markets: Testing the Stylized Facts in the DAX 30. *Journal of Evolutionary Economics*, 2017, vol. 27, iss. 5, pp. 1071–1094.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00191-017-0505-9>
25. Gaunersdorfer A., Hommes C.H., Wagener F.O.O. Bifurcation Routes to Volatility Clustering under Evolutionary Learning. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2008, vol. 67, iss. 1, pp. 27–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2007.07.004>
26. He X.-Z., Li K., Wang C. Volatility Clustering: A Nonlinear Theoretical Approach. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2016, vol. 130, pp. 274–297.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.07.020>
27. He X.-Z., Zheng H. Trading Heterogeneity under Information Uncertainty. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2016, vol. 130, pp. 64–80.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.07.001>
28. LeBaron B. Active and Passive Learning in Agent-Based Financial Markets. *Eastern Economic Journal*, 2011, vol. 37, iss. 1, pp. 35–43. URL: <https://doi.org/10.1057/eej.2010.53>
29. Palczewski J., Schenk-Hoppe K.R., Wang T. Itchy Feet vs Cool Heads: Flow of Funds in an Agent-Based Financial Market. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2016, vol. 63, pp. 53–68.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2015.12.002>
30. Thurner S., Farmer J., Geanakoplos J. Leverage Causes Fat Tails and Clustered Volatility. *Quantitative Finance*, 2012, vol. 12, iss. 5, pp. 695–707.
URL: <http://dx.doi.org/10.1080/14697688.2012.674301>
31. Poledna S., Thurner S., Farmer J.D., Geanakoplos J. Leverage-Induced Systemic Risk under Basel II and Other Credit Risk Policies. *Journal of Banking and Finance*, 2014, vol. 42, pp. 199–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2014.01.038>
32. Aymanns C., Farmer J.D. The Dynamics of the Leverage Cycle. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 50, pp. 155–179. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2014.09.015>
33. Ulyayev L.R. [Modeling the impact of individual risk management tools on the volatility of financial assets]. *Audit i finansovyi analiz = Audit and Financial Analysis*, 2017, no. 5-6, pp. 653–659. (In Russ.)
34. Ulyayev L.R. [Modeling the impact of short-selling on financial market volatility using an agent-based approach]. *Intellekt, innovatsii, investitsii = Intelligence, Innovations, Investments*, 2018, no. 7, pp. 51–60. (In Russ.)

35. Chang A.C., Li P. Is Economics Research Replicable? Sixty Published Papers from Thirteen Journals Say “Usually Not”. Finance and Economics Discussion Series 2015-083. Washington, Board of Governors of the Federal Reserve System, 2015.
URL: <http://dx.doi.org/10.17016/FEDS.2015.083>

Conflict-of-interest notification

I, the author of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.