

УДК 519.876:336.76:004.94

***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ НА
РЫНКЕ ЦЕННЫХ БУМАГ НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА В
СРЕДЕ ANYLOGIC***

Орлова Т.С.

*д.ф.н., профессор,
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия*

Гонцова М.С.

*ассистент,
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия*

Гонцова А.О.

*магистрант,
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия*

Гиззатуллин К.Р.

*студент,
Уральский государственный экономический университет
Екатеринбург, Россия*

Аннотация

В статье рассматривается подход к исследованию микроструктуры и динамики фондового рынка с использованием агентного имитационного моделирования. На базе инструментальной среды AnyLogic 8 PLE разработана концептуальная и математическая модель взаимодействия гетерогенных трейдеров и рыночного механизма формирования цены. Описаны результаты серии вычислительных экспериментов (базового, стресс-тестирования волатильности и оптимизационных), подтверждающие адекватность модели и демонстрирующие возможности управления рыночным риском и ликвидностью.

Ключевые слова: фондовый рынок, имитационное моделирование, AnyLogic.

***MODELING OF PRICING PROCESSES IN THE SECURITIES MARKET
BASED ON AN AGENT-BASED APPROACH IN THE ANYLOGIC
ENVIRONMENT***

Orlova T.S.

*Doctor of Philosophy, Professor,
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia*

Goncova M.S.

*Assistant,
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia*

Goncova A.O.

*Master's Student,
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia*

Gizzatullin K.R.

*Student,
Ural State University of Economics
Yekaterinburg, Russia*

Abstract. The article discusses an approach to studying the microstructure and dynamics of the stock market using agent-based simulation modeling. Based on the AnyLogic 8 PLE tool environment, a conceptual and mathematical model of interaction between heterogeneous traders and the market price formation mechanism has been developed. The results of a series of computational experiments (basic, volatility stress testing and optimization) are described, confirming the adequacy of the model and demonstrating the capabilities of managing market risk and liquidity.

Keywords: stock market, simulation modeling, AnyLogic.

Ценообразование на рынке ценных бумаг относится к числу наиболее сложных и слабо предсказуемых экономических процессов, поскольку формируется под воздействием множества взаимосвязанных факторов, включая поведение участников рынка, информационные ожидания, уровень ликвидности и реакцию на внешние шоки. Классические аналитические модели нередко опираются на предпосылки рациональности и равновесия, что ограничивает их применимость для описания нелинейной динамики реальных финансовых систем.

В этих условиях все большую значимость приобретает агентное моделирование, позволяющее воспроизводить поведение гетерогенных участников рынка и исследовать эмерджентные эффекты, возникающие в результате их взаимодействия. Современные исследования показывают, что агентные модели способны отражать адаптивные стратегии, влияние ожиданий и поведенческих факторов, а также воспроизводить устойчивые режимы и колебания цен в финансовой системе [1-2]. Для реализации таких моделей активно используется среда AnyLogic, обеспечивающая удобные средства построения имитационных экспериментов и визуализации результатов.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки формализованного подхода к моделированию механизма ценообразования на рынке ценных бумаг с учетом поведенческой неоднородности агентов и сценариев рыночной динамики. Цель статьи заключается в разработке агентной модели ценообразования в среде AnyLogic и исследовании влияния параметров поведения агентов на динамику рыночной цены. Для достижения цели решаются следующие задачи: анализ подходов к моделированию финансовых рынков, формализация набора агентов и их правил принятия решений, реализация модели в AnyLogic и проведение вычислительных экспериментов с оценкой полученных сценариев.

В настоящее время для исследования и описания сложных социально-экономических систем применяются различные подходы к имитационному моделированию, среди которых наиболее распространены дискретно-событийное моделирование, системная динамика и агентное моделирование [3-5]. Сравнение указанных методов моделирования по ключевым характеристикам представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение подходов имитационного моделирования для задач фондового рынка

Подход	Уровень детализации	Преимущества	Ограничения	Область применимости
Дискретно-событийный	Средний/высокий	Точное описание последовательности событий, очередей и процессов	Требует явного задания событий и структур	Микроструктура торгов, операционные процессы
Системная динамика	Низкий/средний	Простота анализа агрегатов, причинно-следственные петли	Слабо отражает неоднородность участников	Макроуровень, агрегированные показатели
Агентный	Высокий	Естественное описание поведения участников, неоднородность стратегий	Требует калибровки правил, вычислительная нагрузка	Поведение трейдеров, формирование цены, сценарный анализ

Модель реализована в среде AnyLogic, которая обеспечивает поддержку мультипарадигменного моделирования и позволяет визуализировать поведение системы в динамике. Архитектура разработанной системы включает три ключевых класса агентов. *Main*– корневой агент, агрегирующий популяцию, управляющий глобальным системным таймером (tick) и фиксирующий выходную статистику. *Trader*– гетерогенные участники рынка ($N = 200$), генерирующие заявки на покупку, продажу или удержание актива. *Market*– агент биржи, осуществляющий клиринг, агрегирование спроса и перерасчет рыночной цены.

Математическая модель, описывающая логику функционирования представленных агентов и алгоритм их пошагового взаимодействия, формализована в виде системы следующих целевых показателей.

Обновление рыночной цены на каждом временном шаге t происходит по экспоненциальному закону с учетом дисбаланса спроса/предложения и экзогенного шока

$$P_{t+1} = P_t \cdot \exp(\alpha \cdot D_t + \varepsilon_t)$$

где,

P_t – цена актива в момент времени t ;

α – коэффициент чувствительности цены к дисбалансу;

$\varepsilon_t \sim \mu(0, \delta)$ – случайный стохастический шок (параметр волатильности σ);

D_t – чистый агрегированный спрос, определяемый как сумма индивидуальных решений трейдеров $o_{i,j} \in \{-1, 0, +1\}$.

На основе сформулированной математической модели был разработан алгоритм имитации одного торгового шага, отражающий последовательность действий агентов и механизм пересчета рыночной цены. Для наглядного представления логики взаимодействия участников и порядка вычислений ниже приведена блок-схема (рисунок 1) расчета одного тика, которая позволяет визуализировать переход от формальных зависимостей к реализации модели в среде AnyLogic.

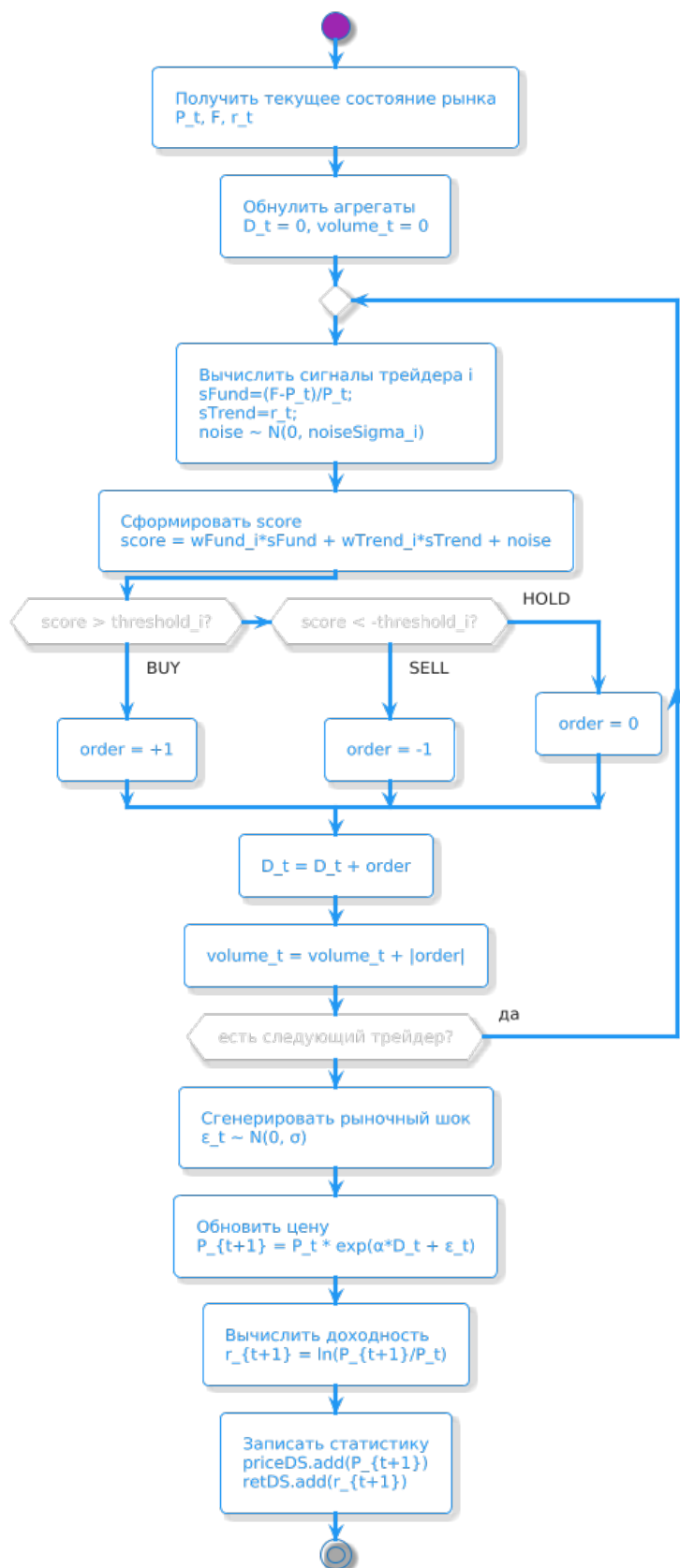


Рис. 1 – Блок-схема расчета одного тика¹

¹ Составлено авторами

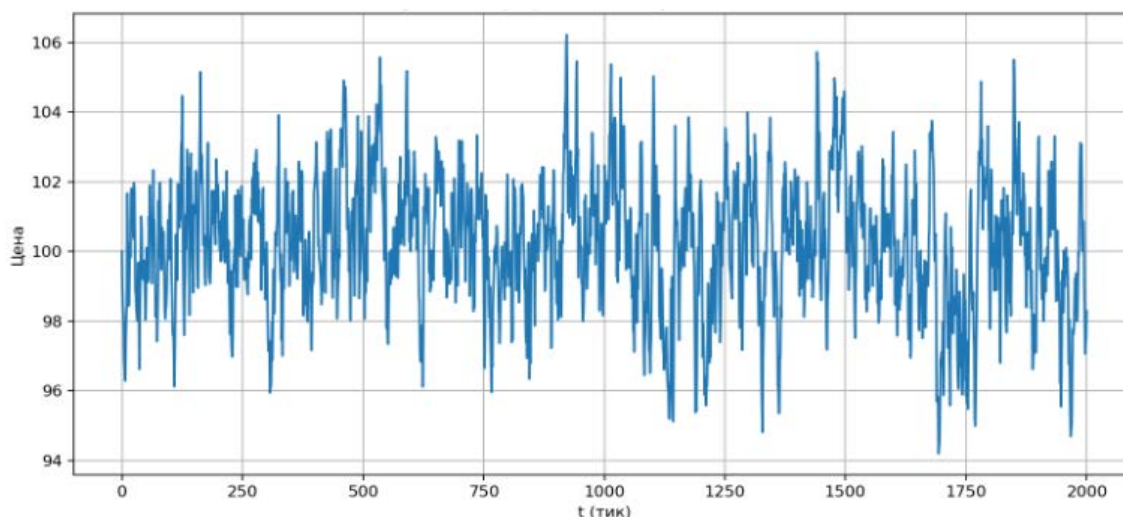
Логика модели реализована в циклическом событии *tick*, в рамках которого на каждом шаге последовательно выполняются обнуление агрегированных показателей рынка, вычисление сигналов и торговых решений каждого трейдера, агрегирование заявок и объемов, обновление цены и доходности актива, а также запись полученных значений в наборы данных и обновление графиков [6]. Затем проверяется условие завершения моделирования по достижении заданного числа шагов *steps*. Диаграмма агента Main представлена на рисунке 2.



Рис. 2 – Диаграмма агента Main²

По результатам симуляции модели была получена траектория изменения цены финансового актива в заданном временном интервале. График смоделированной цены представлен на рисунке 3.

² Составлено авторами

Рис. 3 – График смоделированной цены P_t ³

Интерпретация базового результата показывает, что при выбранных параметрах процесс цены остается устойчивым, колеблется вокруг фундаментального уровня и демонстрирует реалистичный порядок величины волатильности (в сопоставимых условных единицах). Наличие небольшой отрицательной средней доходности в конкретной реализации связано с случайностью и распределениями параметров агентов.

Дополнительно установлено, что при выборе слишком большого значения α без масштабирования по N модель становится неустойчивой из-за экспоненциального обновления цены. Поэтому выбор α является критически важным этапом калибровки.

Разработанная агент-ориентированная модель подтвердила высокую эффективность применения методов компьютерной симуляции для анализа искусственных финансовых рынков. Выявленные закономерности управляемости ликвидности через поведенческий порог и волатильности могут быть применены для проектирования высокочастотных торговых роботов, а также для формирования регуляторных требований по ограничению

³ Составлено авторами

агрессивности участников в периоды высокой макроэкономической неопределенности.

Библиографический список:

1. Лукасевич И.Я. Исследование зависимостей и оценка влияния мировых фондовых рынков на фондовый рынок России // Экономика. Налоги. Право. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 44-56. – DOI 10.26794/1999-849X-2020-13-4-44-56.
2. Сергеев А.В. Моделирование валютных курсов на рынке forex и имитационное моделирование рисков с использованием метода Монте-Карло // Мягкие измерения и вычисления. – 2019. – № 1(14). – С. 50-60. – EDN EPRERD.
3. Вайсбек С.А. Имитационное моделирование деятельности организации по 1С-сопровождению государственных учреждений // В мире научных открытий: материалы IX Международной студенческой научной конференции, Ульяновск, 12-14 марта 2025 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2025. – С. 4804-4807. – EDN BGMNМК.
4. Коковихин А.Ю., Кольева Н.С., Кортенко Л.В. Имитационное моделирование бизнес-процессов в корпорации (пакеты прикладных программ в управлении персоналом). Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2024. – 261 с. – EDN VTDAHE.
5. Фялковский Е.Е. Использование имитационного моделирования для решения задач реинжиниринга бизнес-процессов в среде моделирования Anylogic // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 67-75. – DOI 10.25206/2311-4908-2021-8-1-67-75.
6. Кольева Н.С., Кортенко Л.В., Кротова В.А. Анализ и диагностика цифровой трансформации IT-компании // Экономические системы. – 2025. – Т. 18, № 4. – С. 90-106. – DOI 10.29030/2309-2076-2025-18-4-90-106.