

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Пастушков Алексей Владимирович

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИНАНСОВЫХ РЫНКОВ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ
ДИНАМИКА С ИЗДЕРЖКАМИ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ И
ОБУЧЕНИЕМ**

РЕЗЮМЕ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата экономических наук

Научный руководитель:
PhD Усвицкий Александр Вадимович

JEL: C63, D4, D82, G14

Москва – 2025

Вопросу эффективности финансового рынка традиционно уделяется повышенное внимание в работах финансовых экономистов. Это обусловлено тем, что эффективность цен финансовых активов не только определяет доходность от спекулятивных транзакций, но и влияет на эффективность аллокации капитала в реальном секторе. (Fama, Miller, 1972) Каналом, связывающим эффективность финансового рынка и реального сектора, являются решения менеджмента компаний по вопросам привлечения и аллокации капитала, зачастую принимаемые с учетом рыночных цен финансовых активов. (см. напр., Bond et al. 2012, Subrahmanyam, Titman 1999)

Долгое время господствующей гипотезой в работах финансовых экономистов была гипотеза об эффективном рынке (Efficient Market Hypothesis), постулирующая, что любые отклонения рыночных цен от фундаментальной стоимости финансовых активов быстро корректируются т.н. арбитражерами, заинтересованными в отслеживании таких отклонений и получении прибыли, результирующей из покупок недооцененных и коротких продаж переоцененных активов. (Fama 1970) Действия арбитражеров, в свою очередь, приводят к тому, что цены финансовых активов описываются процессом случайного блуждания. Именно на проверке гипотезы о случайному блужданию строятся эмпирические тесты эффективности рынка. (Fama 1991)

Однако на протяжении всей истории эмпирических исследований эффективности рынков получаемые результаты свидетельствуют в пользу наличия статистических аномалий, ставящих под сомнение гипотезу о случайному блужданию. Среди прочих можно упомянуть широко задокументированные январский эффект (January effect) (Haugen, Jorion 1996; Haug, Hirshey 2006) и эффект размера (size effect) (Keim 1983). Кроме того, существуют исследования, показывающие, что волатильность цен финансовых активов значительно превосходит волатильность переменных, коррелирующих с фундаментальной стоимостью (Shiller 1987), а также что финансовые рынки, независимо от географической локации и типов компаний,

торгуемых на них, обладают рядом общих свойств, т.н. стилизованных фактов (stylized facts) (Lux 2009). Наличие этих общих свойств, таких как тяжелохвостые распределения доходностей и кластеризованная волатильность, ставят под сомнение гипотезу о том, что цены финансовых активов полностью отражают широко варьирующиеся фундаментальные стоимости компаний, работающих в различных отраслях, юрисдикциях и географических локациях.

Приблизительно с конца 1970x – начала 1980x годов активно развиваются исследования, цель которых – объяснить эмпирические наблюдения отклонений от эффективности микроструктурными свойствами финансовых рынков и их участников. В этой обширной литературе можно выделить такие направления, как моделирование рынков с ассиметрично информированными инвесторами (см. напр. Grossman, Stiglitz 1980, Diamond, Verrecchia, 1981), а также детальное моделирование процесса торговли между участниками финансового рынка (см. напр. Glosten, Milgrom, 1985, Kyle 1985, 1989, Milgrom, Stokey, 1982). Данные работы показывают, что, с одной стороны, степень эффективности рынка определяется той информацией, которой располагают инвесторы, а с другой – тем, насколько агрессивно инвесторы используют эту информацию в процессе торговли. Как правило, эти модели исходят из предпосылки о рациональных ожиданиях и ставят задачу поиска долговременного равновесия.

Однако в последние годы все большее количество исследователей отмечало, что равновесные модели с рациональными ожиданиями только обнаруживают возможные равновесия (необязательно уникальные), но не объясняют, каким именно образом рынок выбирает равновесие и приходит к нему.

Решения проблемы выбора равновесия в моделях с гетерогенно информированными агентами были предложены в работах по т.н. эволюционным финансам (см. напр. Sciubba 2005, Gong, Diao, 2022). Основная предпосылка эволюционных моделей финансовых рынков состоит в том, что

гетерогенность агентов влечет за собой различия в доходности их инвестиционной деятельности, а, следовательно, и различия в долях совокупного капитала на рынке, которые они аккумулируют. (см. Evstigneев et al. 2009) Более успешные агенты со временем получают доминирующую долю капитала, тогда как менее успешные банкротятся и уходят с рынка. Таким образом, эволюционные модели асимптотически приходят к равновесию, в котором на рынке существует один или несколько типов инвесторов со стабильными долями капитала.

Нежелательное свойство эволюционных моделей, однако, состоит в том, что гетерогенные агенты наделяются фиксированными типами поведения, которых они придерживаются независимо от их успешности. В контексте моделей с ассиметричной информацией, например, это означает, что эндогенное приобретение информации не моделируется. В контексте моделей, в которых каждый инвестор имеет ненулевой рыночный импакт, не моделируется эндогенный выбор инвестором объема спроса.

Активное развитие алгоритмов обучения с подкреплением и мультиагентных моделей в последние годы, однако, позволяет использовать альтернативное решение проблемы поиска равновесий – моделирование инвесторов как ограниченно рациональных агентов, наделенных алгоритмами обучения с подкреплением. (Lussange et al. 2018, Axtell, Farmer, 2025) Такие модели, с одной стороны, позволяют эндогенизировать стратегические решения инвестора, а с другой моделируют эти решения эксплицитно, в отличие от моделей с рациональными ожиданиями.

В данной диссертационной работе путем построения агент-ориентированной модели с агентами, обучающимися по алгоритмам обучения с подкреплением, исследуются два источника потенциальной неэффективности рыночных цен финансовых активов: отказ инвесторов от приобретения информационного сигнала и эксплуатация инвесторами их рыночной власти. При этом, оценивается влияние на эффективность рынка таких факторов, как уровень

информационных издержек, тип алгоритма обучения, используемый инвесторами, а также количество инвесторов на рынке. Изучение данных вопросов в рамках агент-ориентированных симуляций позволяет не только определить долгосрочные равновесия рынка, но также выявить предасимптотическую динамику. Выводы, полученные в результате проведенного исследования, могут быть использованы регулятором финансовых рынков при разработке и оценке потенциальной эффективности регуляторных вмешательств.

Объект, предмет исследования

Объект исследования данной диссертационной работы – финансовый рынок аукционного типа, на котором взаимодействуют агенты, эндогенно принимающие решение о покупке информационного сигнала и агрессивности своих транзакций.

Предмет исследования – динамика эффективности данного рынка.

Цель и задачи исследования

Цель данного исследования – построение моделей, позволяющих изучить динамические свойства эффективности финансового рынка под влиянием двух типов рыночных фрикций: информационных издержек и стратегического выбора уровня спроса на финансовый актив (т.е. эксплуатации рыночной власти).

Задачами исследования являются:

1. Систематизация научной литературы по агент-ориентированному и эволюционному моделированию финансовых рынков
2. Разработка концептуальной модели рынка с инвесторами, обучающимися эндогенно приобретать информационный сигнал и выбирать степень агрессивности своих транзакций с помощью алгоритмов обучения с подкреплением.

3. Имплементация концептуальной мультиагентной модели средствами языка Python с использованием параллельных вычислений.
4. Аналитическое решение модели агрессивности торговли, нахождение равновесия по Нэшу.
5. Статистический анализ данных, полученных в симуляциях, с целью выявления зависимости эффективности рынка от информационных издержек.
6. Статистический анализ данных с целью выявления зависимости эффективности рынка и сходимости модели к равновесию по Нэшу от используемого алгоритма обучения и количества агентов на рынке.

Степень разработанности темы исследования

Литературу по микроструктуре финансовых рынков можно разделить на два широких направления: исследования **эффектов асимметричной информации** и исследования **эффектов рыночной власти**. Некоторые работы по микроструктуре рынков сочетают исследования обоих эффектов.

В рамках ранних исследований **эффектов асимметричной информации** можно выделить работу Гроссмана-Стиглица (Grossman, Stiglitz, 1980). Построив модель с рациональными ожиданиями и совершенной конкуренцией¹, авторы показывают, что при ненулевых информационных издержках равновесие с полностью эффективными ценами невозможно: равновесие на финансовом рынке достигается только при наличии экзогенного шума². В отсутствие шума равновесие невозможно, т.к. в ситуации, когда все трейдеры неинформированы, покупка информационного сигнала имеет положительную предельную полезность, а в ситуации, когда все трейдеры информированы, положительную предельную полезность имеет *отказ* от покупки сигнала. В отличие от модели Гроссмана-Стиглица, в нескольких работах были предложены модели, в которых инвесторы имеют доступ к

¹ Т.е. отсутствием рыночного импакта транзакций отдельного агента.

² Этот шум может интерпретироваться как генерируемый трейдерами, торгующими по нефункциональным мотивам (напр., с целью ликвидации имеющейся позиции).

гетерогенным информационным сигналам, ни один из которых не отражает фундаментальную стоимость финансового актива полностью. Так, например, в работе (Diamond, Verrecchia, 1981) показано, что наличие у инвесторов гетерогенных сигналов не позволяет цене быть полностью эффективной даже в отсутствие экзогенного шума. (Figlewski 1982) исследует, какие свойства информационных сигналов ведут к положительной ожидаемой прибыли от использования сигналов в спекулятивной торговле, и обнаруживает, что статистическая независимость сигнала от рыночной цены играет большую роль, чем точность. Второй результат работы (Figlewski 1982) заключается в том, что степень, в которой рыночная цена актива отражает гетерогенные сигналы, распределенные между инвесторами, зависит от рыночного импакта их транзакций, который в свою очередь зависит от доступного инвесторам капитала. Таким образом, вероятность того, что рыночная цена будет совершенным агрегатором информации на конечном промежутке времени чрезвычайно мала. Модель (Verrecchia 1982) интегрирует гетерогенность информационных сигналов и эндогенное решение инвесторов о покупке этих сигналов. Результат данной работы заключается в нахождении равновесия, в котором инвесторы эндогенно принимают решение о покупке гетерогенных сигналов. Полученное описание равновесия позволяет установить, что эффективность цен повышается при снижении уровня шума, снижении информационных издержек и повышении толерантности к риску. В работе (Ho, Roni, 1988) исследуется, какое влияние на решение о покупке информационного сигнала оказывают гетерогенные шкалы информационных издержек. Авторы показывают, что в равновесии предельные информационные издержки для различных акций равны, хотя их шкалы издержек могут отличаться, а, следовательно, цены акций небольших компаний могут быть менее эффективными.

Следует отметить, что исследования влияния асимметричной информации на эффективность рынка не теряют актуальности и по сей день. Особый интерес представляют результаты исследований влияния регуляторных вмешательств

на доступность информации. В обзоре (Goldstein, Yang, 2017) рассматривается вопрос о влиянии уровня публично доступной информации на эффективность рынка, а также несколько других мер качества рынка: ликвидность, цену капитала и волатильность. Авторы показывают, что повышение доступности информации как следствие повышения уровня публикации финансовой отчетности оказывает немонотонное влияние на меры качества рынка. Среди прочего, в зависимости от изначального уровня публичной информации, ее увеличение может как повышать, так и понижать эффективность рынка. Этот результат объясняется эффектом вытеснения публичной информацией частного приобретения информации инвесторами. Таким образом, повышение регулятором требований к финансовой отчетности необязательно приводит к повышению эффективности рынка.

Смежной темой является и влияние информационных издержек на уровень эффективности рынка. Так же, как и повышение регуляторных требований к финансовой отчетности, понижение информационных издержек делает информацию более доступной. Несмотря на то, что ранее упомянутые работы Grossman & Stiglitz (1980) и Verrecchia (1982) говорят в пользу повышения эффективности в результате снижения информационных издержек, эти результаты были получены в моделях с рациональными ожиданиями. Открытым остается вопрос, как уровень информационных издержек влияет на эффективность рынка, когда инвесторы адаптируют свои стратегии покупки информационного сигнала с помощью обучения. В контексте современных высокоавтоматизированных финансовых рынков данный вопрос приобретает не только абстрактно-теоретическую, но и практическую значимость. Известно, например, что оператор бирж деривативных финансовых инструментов CME Group предлагает инвесторам доступ к высокочастотной информации о торгах с почасовой оплатой доступа.³ Можно предположить, что как минимум некоторые профессиональные участники рынка используют

³ См. <https://www.cmegroup.com/market-data/connect-data/cloud-mdp.html>

адаптивные алгоритмы для принятия решения о целесообразности покупки этого информационного сигнала. Однако тема влияния информационных издержек на эндогенное решение о покупке сигнала, и как следствие, рыночную эффективность в моделях с адаптивно обучающимися агентами по сей день остается малоизученной.

Второе обширное направление исследований в литературе по микроструктуре финансовых рынков – это влияние **эффектов рыночной власти**. В своей работе (Kyle 1989) отмечает, что результат о невозможности равновесия в отсутствие шума, полученный (Grossman, Stiglitz, 1980), — это, как минимум частично, следствие предположения о совершенной конкурентности рынка. В реальности институциональные инвесторы оказывают существенное влияние на изменения цен финансовых активов и знают о своем рыночном импакте. Вследствие этого (Kyle 1989) предлагает моделировать инвесторов как агентов, стратегически выбирающих свой уровень спроса на финансовый актив, т.е. финансовый рынок рассматривается как *несовершенно конкурентный*. В своей работе (Kyle 1989) показывает, что при несовершенной конкуренции возможны ситуации, когда все инвесторы являются информированными, но при этом рыночная цена актива не отражает всю частную информацию. Таким образом, в данной работе идентифицируется еще один канал потенциальной неэффективности финансовых рынков – эксплуатация участниками рынка своей рыночной власти.

В ситуации, когда рынок несовершенно конкурентен, и каждый участник оказывает существенное влияние на изменение цен финансовых активов, встает вопрос о возможности кооперативного поведения с целью эксплуатации рыночной власти. В последние годы в экономике и финансах активно развивается литература, изучающая возможность кооперации между обучающимися участниками рынка. Например, в работе (Calvano et al. 2020) рассматривается динамическая модель рынка, на котором в каждом периоде две конкурирующие фирмы устанавливают цены на свою продукцию

используя алгоритм обучения Q-Learning. Авторы обнаруживают, что алгоритмы могут привести конкурирующие фирмы к кооперации, которая поддерживается схемой наказаний и поощрений. Хотя в работе моделируется нефинансовый рынок, результаты (Calvano et al. 2020) получили развитие в исследованиях алгоритмической кооперации на финансовых рынках. Так, например, (Cartea et al. 2022) строят модель рынка, на котором взаимодействуют маркет-мейкеры (ММ), использующие различные алгоритмы обучения с подкреплением. Авторы обнаруживают, что при повышении количества конкурирующих ММ кооперативное поведение становится невозможным, независимо от используемого алгоритма обучения. (Han 2022) исследует модель, в которой участники рынка используют алгоритм Q-Learning, и приходит к противоположному выводу: кооперативное поведение между участниками рынка возникает в отсутствие эксплицитной коммуникации, и повышение количества участников рынка не ведет к исчезновению кооперативного поведения. Dou et al. (2024) исследуют, как способность обучающихся агентов поддерживать кооперативное поведение зависит от уровня шумового трейдинга, и обнаруживают, что как при высоком, так и при низком уровне шума, кооперация возможна, хотя и обусловлена различными механизмами.

Необходимо отметить, что существующие работы, изучающие способность различных алгоритмов обучения приходить к кооперативному поведению на финансовых рынках, исследуют т.н. дилерские рынки, т.е. рынки, на которых участники конкурируют, выбирая ценовой спред. Вопрос о возможности кооперативного поведения обучающихся алгоритмов на рынках аукционного типа остается малоизученным. В то же время практическая релевантность аукционных рынков высока, т.к. фондовые рынки и рынки деривативных финансовых инструментов зачастую используют именно аукционные

рыночные механизмы. (см. напр., так называемый “Auction on Demand”, проводимый NASDAQ)⁴

Методология исследования

В рамках настоящего диссертационного исследования была построена агент-ориентированная модель финансового рынка аукционного типа. Равновесная цена на рынке определяется т.н. валърасовским аукционистом. Такой выбор рыночного механизма обусловлен с одной стороны тем, что данный механизм может рассматриваться как абстракция более широкого класса аукционов, используемых на финансовых рынках, а с другой – его растущей релевантностью на реальных финансовых рынках (см. например т.н. периодические аукционы, проводимые оператором бирж Cboe⁵).

Агент-ориентированная модель была имплементирована на языке программирования Python с использованием параллельных вычислений. Были имплементированы и интегрированы в модель такие варианты алгоритмов обучения с подкреплением как: Q-Learning, UCB multiarmed bandit и Gradient multiarmed bandit. (см. Sutton, Barto 2018, Auer 2002)

В рамках общей базовой агент-ориентированной модели было построено два варианта: модель, имитирующая эндогенное приобретение инвесторами информационного сигнала, и модель, имитирующая стратегические решения инвесторов об агрессивности торговли.

Для модели, описывающей стратегическое решение об агрессивности торговли, было получено аналитическое решение, т.е. было найдено некооперативное равновесие по Нэшу.

С помощью компьютерных симуляций агент-ориентированной модели была исследована сходимость модели к равновесию и ее предасимптотическая динамика.

⁴ <https://www.nasdaq.com/solutions/auction-on-demand>

⁵ https://www.cboe.com/europe/equities/trading/periodic_auctions_book/

Для анализа выходных данных симуляций были использованы такие инструменты, как линейная регрессия и статистические тесты разности средних значений полученных распределений.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

Первая глава представляет собой критический обзор литературы по агент-ориентированным и эволюционным моделям в финансах и основывается на работе (Pastushkov 2025). В главе рассмотрена мотивация для создания агент-ориентированных и эволюционных моделей финансовых рынков. Проводится контраст между неоклассическими теоретическими равновесными моделями и агент-ориентированными и эволюционными моделями. Сопоставляются преимущества и недостатки этих методов моделирования и определяются приложения, в которых тот или иной метод моделирования является оптимальным. В частности, показано, что преимущество агент-ориентированных моделей состоит в возможности моделировать произвольную степень гетерогенности агентов по ряду параметров (информированность, рациональность, толерантность к риску, временные предпочтения и т.д.), а также не только обнаруживать асимптотические равновесия, но и исследовать динамику сходимости к ним.

Отдельно рассмотрены эволюционные модели финансовых рынков. Показано, что несмотря на то, что эволюционные и агент-ориентированные модели зачастую рассматриваются как одно направление исследований, эти типы моделей не являются синонимичными. Так, эволюционные модели не обязательно являются динамическими, а агент-ориентированные модели не обязательно содержат эволюционные элементы, такие, например, как способность агентов со временем аккумулировать капитал.

Во второй части главы представлен обзор наиболее значимых результатов работ, использующих агент-ориентированное и эволюционное моделирование

в анализе финансовых рынков. Особое внимание уделено т.н. моделям рыночного отбора. (см. Blume, Easley 2009) Модели рыночного отбора исходят из предпосылки, что гетерогенность стратегий участников рынка влечет за собой гетерогенность их прибыльности, а, следовательно, и гетерогенность в их способности аккумулировать капитал. В этой части главы рассмотрены результаты исследований, показывающих, что в результате рыночного отбора не обязательно доминируют наиболее рациональные и информированные участники рынка, так как предпочтения участников по риску, а также их временные предпочтения также оказывают значительное влияние на их способность аккумулировать капитал.

В первой главе также представлен обзор основных элементов агент-ориентированных моделей (таких как рыночный механизм, модель поведения агентов, модель поведения фундаментальной стоимости финансового актива, структура взаимодействий между агентами и т.д.) и типичных вариантов их моделирования (см. LeBaron 2000, 2001). Кроме того, описаны основные подходы к валидации таких моделей.

Вторая глава диссертации основана на работе (Pastushkov 2024) и описывает модель финансового рынка, на котором взаимодействуют инвесторы, эндогенно принимающие решения о покупке информационного сигнала. Инвесторы не обладают априорной информацией об оптимальности той или иной информационной стратегии и вынуждены адаптировать свою стратегию исходя из результатов рыночных взаимодействий. Для моделирования адаптивного обучения инвесторов используется алгоритм UCB из класса т.н. многоруких бандитов (см. описание алгоритма и его свойств в Auer 2002). Два привлекательных свойства данного алгоритма заключаются, с одной стороны, в его простоте и нечувствительности к выбору значения единственного гиперпараметра (а, следовательно, отсутствии необходимости калибровки), а с другой – в том, что в данном алгоритме существует эксплицитная связь между неопределенностью относительно оптимальности стратегий и частотой

экспериментирования. Таким образом, при прочих равных, алгоритм чаще экспериментирует с теми стратегиями, неопределенность относительно которых выше.

Модель также содержит эволюционный элемент, а именно, способность инвесторов аккумулировать капитал.

Цель модели – изучить влияние уровня информационных издержек на уровень эффективности рынка в описанной ситуации.

В главе представлены результаты компьютерных симуляций модели с варьирующимиися уровнями информационных издержек и проведен статистический анализ выходных данных.

Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают классические результаты (Grossman, Stiglitz, 1980) и (Verrecchia 1982) о в целом отрицательной связи информационных издержек с уровнем эффективности рынка. С другой стороны, обнаружено, что при нулевых и околонулевых издержках возникает контринтуитивная ситуация, в которой на рынке предасимптотически доминируют *неинформированные* инвесторы, а, следовательно, рынок не достигает полной эффективности. Этот результат объясняется тем, что снижение информационных издержек до нулевого и околонулевого уровня оказывает синхронизирующее воздействие на алгоритмы обучения инвесторов, а, следовательно, возрастает вероятность выбора неинформированной стратегии *всеми* инвесторами в процессе обучения. Данный результат, таким образом, обнаруживает еще один канал, через который повышение доступности информации может оказывать *негативное* влияние на эффективность рынка.

Третья глава диссертации основана на работе (Pastushkov, Boulatov, 2025). В данной главе описана модель финансового рынка аукционного типа, на котором взаимодействуют агенты, стратегически выбирающие уровень спроса на финансовый актив. Равновесная цена актива определяется механизмом вальрасовского аукциона. Стратегические агенты формируют шкалы спроса

на финансовый актив, в которых уровень спроса зависит от потенциального уровня цены. Как отмечают (Boulatov, George, 2013), такие шкалы могут интерпретироваться как наборы лимитных заявок. Для сохранения математической разрешимости, в данную модель внесен ряд упрощающих предположений по сравнению с моделью, используемой во второй главе. Так, все стратегические трейдеры обладают полной информацией о фундаментальной стоимости торгуемого актива, которая является их резервной ценой. Фундаментальная стоимость актива является константой. Предложение финансового актива, однако, описывается стохастическим процессом белого шума. Стохастическое количество актива, доступное для покупки, может интерпретироваться как предоставляемое т.н. шумовым репрезентативным трейдером, торгующим по нефундаментальным причинам (напр., необходимость ликвидации существующей позиции). Шумовой трейдер нечувствителен к фундаментальной стоимости актива.

Поскольку стратегические трейдеры действуют только как покупатели, их задача сводится к определению оптимальной доли капитала λ_{it} , выделяемой на покупку актива. Прибыль трейдера i описывается уравнением:

$$\pi_{it} = (F - P_t^*) * q_{it} \quad (1)$$

, где F – это фундаментальная стоимость актива, P_t^* - равновесная рыночная цена, а q_{it} – аллокация, получаемая трейдером i .

Интуитивно понятно, что синхронное занижение трейдерами спроса на финансовый актив – в интересах всех стратегических агентов, так как позволяет им покупать актив по заниженной цене. Однако, единственное равновесие по Нэшу в модели описывается уравнением:

$$\lambda_{it} W_{it} = \frac{FN_t(M-1)}{M^2} \quad (2)$$

, где λ_{it} – это доля капитала,alloцируемого трейдером i на покупку актива, W_{it} – уровень капитала трейдера i , N_t – предложение актива на рынке, а M – количество стратегических трейдеров.

Так как равновесие симметрично, совокупный равновесный спрос на актив описывается уравнением:

$$\lambda_t W_t = \frac{FN_t(M - 1)}{M^2} * M = \frac{FN_t(M - 1)}{M} \quad (3)$$

а, следовательно,

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \lambda_t W_t = FN_t \quad (4)$$

Таким образом, равновесная стратегия спроса зависит от количества конкурирующих стратегических трейдеров, и при росте количества трейдеров совокупный равновесный спрос асимптотически приближается к фундаментальной стоимости актива.

Однако, в свете противоречивых результатов относительно способности алгоритмов обучения с подкреплением координировать свои стратегии (см. напр., Han 2022, Cartea et al. 2022), мы исследуем, приходят ли трейдеры, использующие различные алгоритмы обучения, к идентифицированному нами равновесию по Нэшу. Следуя подходу (Cartea et al. 2022), мы сравниваем поведение нескольких алгоритмов из класса многоруких бандитов, а также алгоритм Q-Learning.

Полученные результаты говорят о том, что способность агентов сходиться к равновесию по Нэшу в значительной мере зависит от используемого ими алгоритма обучения. При этом, только для одного из трех алгоритмов агенты достигают равновесия по Нэшу с повышением количества конкурирующих трейдеров M . Для двух других алгоритмов агенты сходятся к пониженному по сравнению с некооперативным равновесием уровню спроса. Эти результаты контрастируют с результатами, полученными Cartea et al. (2022) для дилерского рынка, на котором вне зависимости от используемого трейдерами алгоритма, повышение количества конкурентов ведет к исчезновению кооперативного поведения.

Научная новизна исследования

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложена агент-ориентированная модель эндогенного принятия решения о покупке информационного сигнала, инкорпорирующая элемент рыночного отбора.
2. Обнаружен ранее незадокументированный канал *отрицательного* влияния повышения доступности информации на степень эффективности финансового рынка: понижение информационных издержек до нулевого или околонулевого уровня ведет к синхронизации алгоритмов обучения инвесторов, вследствие чего вероятность синхронного выбора ими *неинформированной* стратегии возрастает.
3. Получено аналитическое решение модели предоставления ликвидности на рынке аукционного типа с уникальным некооперативным равновесием по Нэшу.
4. С помощью компьютерных симуляций агент-ориентированной модели стратегического предоставления ликвидности получен результат о том, что сходимость модели к равновесию по Нэшу в значительной мере зависит от используемых трейдерами алгоритмов обучения, даже при большом количестве взаимодействующих на рынке агентов. При этом для двух из трех алгоритмов схождение к некооперативному равновесию не достигается, в результате чего агенты занижают предоставляемую ликвидность, что ведет к понижению эффективности рынка.

Положения, выносимые на защиту

1. При поиске агентами оптимальной стратегии покупки информационного сигнала с помощью алгоритма обучения с подкреплением, понижение информационных издержек немонотонно влияет на эффективность рынка: для высокого изначального уровня информационных издержек их понижение повышает эффективность рынка, т.к. стимулируется спрос инвесторов на информационный

сигнал. При изначально низком уровне издержек либо при его снижении до нулевого или околонулевого уровня, эффективность рынка понижается, так как происходит синхронизация алгоритмов обучения агентов, ведущая в свою очередь к повышению вероятности одновременного выбора всеми трейдерами неинформированной стратегии.

2. На рынке аукционного типа с инвесторами, стратегически выбирающими уровень предоставляемой ликвидности, равновесный некооперативный выбор уровня ликвидности зависит от количества конкурирующих агентов.
3. Достижение некооперативного равновесия зависит от используемого агентами алгоритма обучения. Способность агентов сходиться к некооперативному равновесному представлению ликвидности является более редким явлением, чем (псевдо-)кооперативное занижение ликвидности.
4. В общем случае повышение количества конкурирующих трейдеров не устраняет (псевдо-)кооперативное поведение агентов.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость исследования состоит, во-первых, в том, что был впервые обнаружен новый канал негативного влияния повышения доступности информации на эффективность финансовых рынков. Существующая литература по данной тематике документирует потенциальное снижение эффективности рынка при повышении доступности публичной информации за счет эффекта вытеснения частного сбора информации инвесторами. В настоящем диссертационном исследовании описан механизм негативного влияния снижения информационных издержек на эффективность рынка через синхронизацию стратегий покупки информации инвесторами.

Во-вторых, был получен результат, демонстрирующий зависимость стратегического предоставления ликвидности трейдерами на аукционном финансовом рынке от алгоритмов обучения, используемых ими. Было обнаружено, что в общем случае обучение агентов по алгоритмам обучения с подкреплением не ведет к схождению агентов к некооперативному, совершенно конкурентному предоставлению ликвидности. Вследствие этого полная эффективность рынка не достигается даже при условии полной информированности стратегических трейдеров о фундаментальной стоимости актива.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные результаты предоставляют интерес для практики регулирования финансовых рынков. Регуляторы финансовых рынков имеют доступ к инструментам повышения доступности информации (напр., путем повышения требований к публикуемой финансовой отчетности или прозрачности рыночных торгов), а также имеют возможность предписывать использование определенных рыночных механизмов. Полученные результаты показывают, что повышение доступности информации необязательно ведет к повышению эффективности рынка, а алгоритмические трейдеры способны кооперативно занижать уровень предоставляемой ликвидности на рынках аукционного типа. Эти результаты могут учитываться регуляторами рынков при разработке и анализе регуляторных интервенций.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Результаты проведенных исследований в рамках работы над диссертацией были представлены автором к обсуждению на 2 конференциях:

1. II Международная Тихоокеанская школа-конференция по экспериментальной экономике. Даты проведения: 19.09.2022 - 27.09.2022. Дата выступления: 24.09.2022. Доклад: Агент-ориентированное моделирование финансовых рынков;

2. 2024 Global Graduate Student Summer Forum. Место проведения: Пекин, КНР. Даты проведения: 01.07.2024 - 07.07.2024. Дата выступления: 01.07.2024. Доклад: An Evolutionary Model of Financial Market Efficiency with Costly Information.

Промежуточные результаты работы также были представлены на следующих семинарах:

1. Семинар, организованный Международной Лабораторией Экспериментальной и Поведенческой Экономики ВШЭ. Дата выступления: 17.10.2024. Доклад: AI-driven strategic liquidity provision in a centralized order-driven financial market
2. Зимняя школа по компьютерным наукам ФКН ВШЭ. Дата выступления: 01.02.2025

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 3 работах общим объемом 4 п.л.; личный вклад автора составляет 3.5 п.л.:

- Pastushkov, Aleksei. "An Evolutionary Model of Financial Market Efficiency with Costly Information." Экономический журнал ВШЭ 28, no. 2 (2024): 276-301 (на англ. яз.).
- Pastushkov A. V. (2025). Evolutionary and agent- based computational finance: The new paradigms for asset pricing. Журнал Новой экономической ассоциации, 1 (66), 196-222 (на англ. яз.).
- Aleksei Pastushkov, Alexei Boulatov, Pseudo-collusion in a centralized algorithmic financial market, Finance Research Letters, Volume 83, 2025, 107671 (на англ. яз.).

Список литературы:

1. Auer, Peter. "Using confidence bounds for exploitation-exploration trade-offs." *Journal of Machine Learning Research* 3, no. Nov (2002): 397-422.

2. Axtell, Robert L., and J. Doyne Farmer. "Agent-based modeling in economics and finance: Past, present, and future." *Journal of Economic Literature* 63, no. 1 (2025): 197-287.
3. Blume, Lawrence, and David Easley. "Market selection and asset pricing." In *Handbook of financial markets: dynamics and evolution*, pp. 403-437. North-Holland, 2009.
4. Bond, Philip, Alex Edmans, and Itay Goldstein. "The real effects of financial markets." *Annu. Rev. Financ. Econ.* 4, no. 1 (2012): 339-360.
5. Boulatov, Alex, and Thomas J. George. "Hidden and displayed liquidity in securities markets with informed liquidity providers." *The Review of Financial Studies* 26, no. 8 (2013): 2096-2137.
6. Calvano, Emilio, Giacomo Calzolari, Vincenzo Denicolo, and Sergio Pastorello. "Artificial intelligence, algorithmic pricing, and collusion." *American Economic Review* 110, no. 10 (2020): 3267-3297.
7. Cartea, Álvaro, Patrick Chang, Mateusz Mroczka, and Roel Oomen. "AI-driven liquidity provision in OTC financial markets." *Quantitative Finance* 22, no. 12 (2022): 2171-2204.
8. Diamond, Douglas W., and Robert E. Verrecchia. "Information aggregation in a noisy rational expectations economy." *Journal of financial economics* 9, no. 3 (1981): 221-235.
9. Dou, Winston Wei, Itay Goldstein, and Yan Ji. "Ai-powered trading, algorithmic collusion, and price efficiency." *Jacobs Levy Equity Management Center for Quantitative Financial Research Paper* (2024).
10. Evstigneev, Igor V., Thorsten Hens, and Klaus Reiner Schenk-Hoppé. "Evolutionary finance." *Handbook of financial markets: dynamics and evolution* (2009): 507-566.
11. Fama EF, Miller M. 1972. The Theory of Finance. New York: Holt, Rinehart & Winston
12. Fama, Eugene F. "Efficient capital markets." *Journal of finance* 25, no. 2 (1970): 383-417.

- 13.Fama, Eugene F. "Efficient capital markets: II." *The journal of finance* 46, no. 5 (1991): 1575-1617.
- 14.Figlewski, Stephen. "Information diversity and market behavior." *The Journal of Finance* 37, no. 1 (1982): 87-102.
- 15.Glosten, Lawrence R., and Paul R. Milgrom. "Bid, ask and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders." *Journal of financial economics* 14, no. 1 (1985): 71-100.
- 16.Goldstein, Itay, and Liyan Yang. "Information disclosure in financial markets." *Annual Review of Financial Economics* 9, no. 1 (2017): 101-125.
- 17.Gong, Qingbin, and Xundi Diao. "Bounded rationality, asymmetric information and mispricing in financial markets." *Economic Theory* 74, no. 1 (2022): 235-264.
- 18.Grossman, Sanford J., and Joseph E. Stiglitz. "On the impossibility of informationally efficient markets." *The American economic review* 70, no. 3 (1980): 393-408.
- 19.Han, Bingyan. "Cooperation between independent market makers." *Quantitative Finance* 22, no. 11 (2022): 2005-2019.
- 20.Haug, Mark, and Mark Hirshey. "The january effect." *Financial Analysts Journal* 62, no. 5 (2006): 78-88.
- 21.Haugen, Robert A., and Philippe Jorion. "The January effect: Still there after all these years." *Financial Analysts Journal* 52, no. 1 (1996): 27-31.
- 22.Hellwig, Martin F. "On the aggregation of information in competitive markets." *Journal of economic theory* 22, no. 3 (1980): 477-498.
- 23.Ho, Thomas SY, and Roni Michaely. "Information quality and market efficiency." *Journal of Financial and Quantitative Analysis* 23, no. 1 (1988): 53-70.
- 24.Keim, Donald B. "Size-related anomalies and stock return seasonality: Further empirical evidence." *Journal of financial economics* 12, no. 1 (1983): 13-32.

- 25.Kyle, Albert S. "Continuous auctions and insider trading." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1985): 1315-1335.
- 26.Kyle, Albert S. "Informed speculation with imperfect competition." *The Review of Economic Studies* 56, no. 3 (1989): 317-355.
- 27.LeBaron, Blake. "Agent-based computational finance: Suggested readings and early research." *Journal of Economic Dynamics and Control* 24, no. 5-7 (2000): 679-702.
- 28.LeBaron, Blake. "A builder's guide to agent-based financial markets." *Quantitative finance* 1, no. 2 (2001): 254.
- 29.Lussange, Johann, Alexis Belianin, Sacha Bourgeois-Gironde, and Boris Gutkin. "A bright future for financial agent-based models." *arXiv preprint arXiv:1801.08222* (2018).
- 30.Lux, Thomas. "Stochastic behavioral asset-pricing models and the stylized facts." In *Handbook of financial markets: Dynamics and evolution*, pp. 161-215. North-Holland, 2009.
- 31.Milgrom, Paul, and Nancy Stokey. "Information, trade and common knowledge." *Journal of economic theory* 26, no. 1 (1982): 17-27.
- 32.Pastushkov, Aleksei. "An Evolutionary Model of Financial Market Efficiency with Costly Information." *Экономический журнал Высшей школы экономики* 28, no. 2 (2024): 276-301.
- 33.Pastushkov A. V. (2025). Evolutionary and agent- based computational finance: The new paradigms for asset pricing. *Journal of the New Economic Association*, 1 (66), 196 222 (in English).
- 34.Aleksei Pastushkov, Alexei Boulatov, Pseudo-collusion in a centralized algorithmic financial market, *Finance Research Letters*, Volume 83, 2025, 107671
- 35.Sciubba, Emanuela. "Asymmetric information and survival in financial markets." *Economic Theory* 25, no. 2 (2005): 353-379.
- 36.Shiller, Robert J. "The volatility of stock market prices." *Science* 235, no. 4784 (1987): 33-37.

37. Subrahmanyam, Avanidhar, and Sheridan Titman. "The going-public decision and the development of financial markets." *The Journal of Finance* 54, no. 3 (1999): 1045-1082.
38. Sutton, Richard S., and Andrew G. Barto. "Reinforcement learning: An introduction.", second ed. The MIT Press (2018), Cambridge.
39. Verrecchia, Robert E. "Information acquisition in a noisy rational expectations economy." *Econometrica: Journal of the Econometric Society* (1982): 1415-1430.