

УТВЕРЖДАЮ

и. о. директора ФИЦ ИУ РАН,

Флинт-корр. РАН



Посыпкин М. А.

июль 2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук»

Диссертационная работа Макарова Ивана Сергеевича «Разработка методов прогнозирования точек разворота на многомерных временных рядах финансовых рынков на основе моделей машинного обучения с подкреплением», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.1 – «Искусственный интеллект и машинное обучение», выполнена в отделе №13 Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук.

В период подготовки диссертации и в настоящее время соискатель ученой степени Макаров Иван Сергеевич контактировал с компанией Общество с ограниченной ответственностью «Интеллектуальные Системы Управления» в целях внедрения результатов работы.

В 2020 г. окончил Физтех-школу прикладной математики и информатики Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) по специальности «Прикладные математика и физика». С 2020 по 2024 г. обучался в очной аспирантуре МФТИ (НИУ). В 2024 г. был прикреплен к аспирантуре ФИЦ ИУ РАН как соискатель.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., проф. Цурков Владимир Иванович – работает в федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» в должности Заведующего Отделом №13 (сложных систем) ФИЦ ИУ РАН.

По итогам обсуждения было принято следующее заключение:

### **Актуальность темы исследования:**

Разработка систем автоматизированной торговли и инвестиционных стратегий является основной задачей управляющих финансовых организаций и обычно сводится к решению задач прогнозирования показателей на многомерных финансовых временных рядах (MFTS -

Multidimensional Financial Time Series). Наиболее актуальными считаются исследования комбинированных моделей, которые позволяют сочетать в себе анализ данных из различных источников. Большинство задач предполагают обработку больших объемов данных MFTS. Перспективным направлением являются модели обучения с подкреплением.

### **Цель работы:**

Разработка методов прогнозирования точек разворота на многомерных финансовых временных рядах на основе моделей машинного обучения нейронных сетей с подкреплением.

В ходе работы были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Определение статистических свойств многомерных финансовых временных рядов, а именно, свойств стационарности, самоподобия, корреляции и волатильности.
2. Оценка применимости моделей классического машинного обучения с учителем при решении задач прогнозирования на многомерных финансовых временных рядах.
3. Разработка среды для обучения с подкреплением моделей на основе нейронных сетей с рекуррентными слоями; построение, обучение, ансамблирование и оценка моделей.
4. Построение дополнительных вторичных признаков для многомерных финансовых временных рядов криптовалютного рынка на основе биржевой ленты сделок.
5. Разработка гибридного решения на основе сочетания алгоритмической стратегии и модели машинного обучения, фильтрующей сигналы алгоритмической стратегии.
6. Реализация предложенных моделей в составе системы автоматизированной торговли.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Доказано, что применение моделей машинного обучения позволяет достичь более высоких результатов в терминах доходности и других финансовых показателей, если они используются в качестве фильтра сигналов исходной алгоритмической стратегии, построенной на классических индикаторах или осцилляторах технического анализа, таких как экспоненциально сглаженные скользящие средние, полосы Боллинджера, индексы относительной силы и другие сглаживающие инструменты.
2. Предложен двухэтапный метод оптимизации гибридной стратегии, в рамках которого на первом этапе решается задача многокритериальной оптимизации для поиска наиболее стабильных параметров алгоритмической стратегии, а на втором этапе выполняется обучение с подкреплением DQN модели машинного обучения на данных многомерных временных рядов, дополненных сигналами исходной жесткой алгоритмической стратегии.
3. Сформированы дополнительные вторичные признаки для криптовалютного рынка, а именно аперiodические признаки на основе биржевой ленты сделок. Предложена гибридная модель многомерного временного ряда, сочетающая в себе данные различных типов из нескольких источников. Разработана архитектура модели на основе нейронной сети типа DQN с модулем автокодировщика, позволяющего снизить размерность дополненных признаками временного ряда.



### **Научная новизна работы:**

Научная новизна работы заключается в том, что предложен подход использования комбинированного MFTS, сочетающего в себе первичные признаки, и вторичные, вычисленные алгоритмически, такие как уровни поддержки и сопротивления, индикаторы, осцилляторы и другие. Разработана среда для обучения с подкреплением моделей совершению торговых операций, в которой наградой модели является достигнутая ею доходность на тестовом периоде. Разработаны архитектуры моделей машинного обучения на основе нейронных сетей DQN и новой архитектуры ADAM, предназначенные для прогнозирования точек разворота на MFTS. Обученные в разработанной среде модели встроены в систему автоматизированной торговли, в которой являются компонентами активной среднесрочной инвестиционной стратегии и показывают лучшую результативность, чем альтернативные модели и методы, обученные с учителем решению задач классификации и регрессии на размеченных данных или построенные на средствах технического анализа алгоритмические стратегии. Построены дополнительные вторичные признаки MFTS для криптовалютного рынка, а именно аперiodические признаки на основе биржевой ленты сделок и публикаций, и сообщений социальных сетей.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Теоретическая значимость работы заключается в оригинальном решении задачи прогнозирования точек разворота на MFTS за счёт использования дополнительных аперiodических вторичных признаков в составе MFTS и предложенном двухэтапном методе оптимизации гибридной стратегии, которая основана на классической алгоритмической стратегии, сигналы которой фильтруются посредством модели машинного обучения на архитектуре DQN. Практическая ценность обусловлена разработанной автоматизированной торговой системой, в составе которой реализована активная среднесрочная инвестиционная стратегия на основе прогнозирования точек разворота на MFTS посредством комбинирования базовой алгоритмической стратегии и модели машинного обучения с подкреплением.

Результаты работы реализованы и используются в программных продуктах ООО Интеллектуальные Системы Управления.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов подтверждена экспериментальной проверкой результатов предлагаемых методов на реальных исследованиях в рецензируемых научных изданиях и конференциях по машинному обучению; воспроизводимостью результатов исследования при использовании различных тестовых наборов данных из публичных репозиториях данных, в том числе сторонними организациями; публикациями результатов.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались автором на следующих конференциях:

1. 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)
2. 2022 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)



Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в изданиях \ из списка ВАК и приравненных международных наукометрических баз:

1. Makarov I., Kovaleva M., Zinkovich V., Kolovertnova V. Research of Financial Time-series Statistical Properties // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681741.

2. Makarov I., Kovaleva M., Zakharova E., Gorbachev R. Applicability of the kNN Algorithm in the Problem of Pattern Classification on Time Series of Financial Markets // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681724.

3. Makarov I., Kovaleva M., Pankovets E., Konstantinov D. Deep Neural Network Architecture for Solving Classification Problems on Multidimensional Time Series of Financial Markets // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681781.

4. Konstantinov D., Pankovets E., Makarov I., Gorbachev R. Development and Research of a Deep Neural Network Architecture for Solving Regression Problems on Multidimensional Time Series of Financial Markets // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681758.

5. Makarov I., Kovaleva M., Fakhrutdinov T., Gorbachev R. Intelligent Module for System Trading of Financial Markets Assets Based on an Ensemble of Deep Neural Networks and the DQN Learning Algorithm // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-7, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681753.

6. Makarov I., Fakhrutdinov T., Kichik M., Mamontov K., Baskov O., Shumsky S. Forecasting in Financial Markets Using the ADAM Architecture and Reinforcement Learning Methods // International Conference Engineering and Telecommunication (EnT), Dolgoprudny, Russian Federation, 2021, pp. 1-7, DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681797.

7. Esenkov A., Zakharova E., Kovaleva M., Konstantinov D., Makarov I., Pankovets E. Research and application of deep neural network architectures for classification on multidimensional time series // Journal of Computer and Systems Sciences International, 61(4): 616-625, 2022.

8. Makarov I., Bagantsova E., Iashin P., Kovaleva M., Zakharova E. Development of and research into a rigid algorithm for analyzing Twitter publications and its influence on the movements of the cryptocurrency market // Computer Research and Modeling, 15(1): 157-170, 2023.

9. Makarov I., Bagantsova E., Iashin P., Kovaleva M., Gorbachev R. Development of and research on an algorithm for distinguishing features in Twitter publications for a classification problem with known markup // Computer Research and Modeling, 15(1): 171-183, 2023.

10. Makarov I., Bagantsova E., Iashin P., Kovaleva M., Gorbachev R. Development of and research on machine learning algorithms for solving the classification problem in Twitter publications // Computer Research and Modeling, 15(1): 185-195, 2023.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами заключается в следующем: [1] – постановка задачи; определение статистических свойств многомерных временных рядов финансовых рынков; построение выборок данных; [2, 3, 4, 7] – проектирование и реализация моделей машинного обучения с учителем; [5, 6] – проектирование и реализация моделей машинного обучения с подкреплением; [8, 9, 10] – построение дополнительных вторичных



признаков для многомерных временных рядов криптовалютного рынка; усовершенствование моделей; оценка и сравнение результатов.

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают **персональный вклад автора** в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Диссертационная работа Макарова И.С. «Разработка методов прогнозирования точек разворота на многомерных временных рядах финансовых рынков на основе моделей машинного обучения с подкреплением» является законченной самостоятельной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям пунктов 9, 10 и 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а также паспорту научной специальности 1.2.1 – «Искусственный интеллект и машинное обучение» (технические науки), в частности по следующим пунктам:

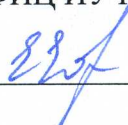
- 5. Методы и технологии поиска, приобретения и использования знаний и закономерностей, в том числе – эмпирических, в системах искусственного интеллекта. Исследования в области совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования. Методы и средства использования экспертных знаний.
- 7. Разработка специализированного математического, алгоритмического и программного обеспечения систем искусственного интеллекта и машинного обучения. Методы и средства взаимодействия систем искусственного интеллекта с другими системами и человеком-оператором.

Диссертация Макарова Ивана Сергеевича на тему: «Разработка методов прогнозирования точек разворота на многомерных временных рядах финансовых рынков на основе моделей машинного обучения с подкреплением» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Заключение принято на заседании семинара отдела №13 отделения №1 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук». Присутствовало на заседании 12 человек. Результаты голосования «за» 12 – человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол №1 от 16 мая 2024 г.

Председатель семинара:  В. Д. Ильин  
д.т.н., проф.  
с.н.с. отдела №13 ФИЦ ИУ РАН

Секретарь:  Е. К. Егорова  
к.ф.-м.н.  
н.с. отдела №13 ФИЦ ИУ РАН