

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Лабусов Максим Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Научный руководитель

Трегуб Илона Владимировна,
доктор экономических наук, профессор

Москва – 2022

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать учёные степени кандидата наук, учёные степени доктора наук согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоятся 29 июня 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.111 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп. 1, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 200 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: www.fa.ru.

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Соловьев В.И., д.э.н., доцент;
заместитель председателя – Одинцов Б.Е., д.э.н., профессор;
учёный секретарь – Золотова Т.В., д.физ.-мат.н., доцент;

члены диссертационного совета:

Абдикеев Н.М., д.техн.н., профессор;
Афанасьев А.А., д.э.н., доцент;
Васильева Е.В., д.э.н., доцент;
Владова А.Ю., д.техн.н., доцент;
Гатаулин Т.М., д.э.н., профессор;
Коровин Д.И., д.э.н., доцент;
Росс Г.В., д.э.н., профессор;
Судаков В.А., д.техн.н., доцент;
Трегуб И.В., д.э.н., профессор.

Автореферат диссертации разослан 21 марта 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Финансового университета Д 505.001.111

Т.В. Золотова

I Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день динамика развития современного мирового хозяйства определяется преимущественно двумя процессами: научно-техническим прогрессом и глобализацией. Стремительное движение научно-технического прогресса в последние годы привело к увеличению скорости работы компьютеров, росту их производительности и снижению себестоимости. Глобализация, являясь общемировым феноменом, ведёт к более тесному и активному технологическому, информационному, экономическому, финансовому, правовому взаимодействию. Воздействие процесса финансовой глобализации на финансовые рынки привело к усилению их взаимозависимости, а также к ускорению процессов, происходящих на таких торговых площадках. В качестве одного из примеров усиления взаимозависимости и ускорения процессов, протекающих на финансовых рынках, можно назвать распространение алгоритмической торговли – совокупности сделок купли-продажи финансовых активов за короткие и сверхкороткие интервалы времени, совершаемых с помощью специальных программных продуктов. Так как данные сделки совершаются быстро, то информационную основу для них составляют так называемые «высокочастотные» данные. Они представляют собой финансовые временные ряды, взятые на малых таймфреймах (от английского time frame) – периодах времени, за которые происходит группировка показателей торговли актива (цены, объёма, спреда). Увеличение частоты совершения алгоритмических сделок участниками рынка ведёт к росту спроса на высокочастотные временные ряды финансовых данных. Рост потребности в изучении алгоритмической торговли для решения практических задач, равно как и постоянно появляющиеся новые технические средства для обработки данных и ведения торговли обуславливают необходимость применения научного метода и научного подхода для изучения высокочастотных финансовых данных.

Процесс изучения высокочастотных финансовых временных рядов состоит в определении структуры таких данных и моделировании их будущих значений.

В последние несколько десятилетий данный процесс всё чаще реализуется посредством моделей, в основу которых заложены технологии искусственного интеллекта. По сравнению с классическими эконометрическими моделями модели искусственного интеллекта могут учитывать фактор нелинейности в данных, а также способны обучаться на «входной» информации. Наибольший прогресс в вопросе обучения моделей искусственного интеллекта был достигнут в рамках применения такого класса моделей, как нейронные сети. При этом остаётся незаполненным пространство для дальнейших исследований в области обучения нейронных сетей, результатом которых может стать совершенствование их архитектуры и повышение точности моделирования данных. Поэтому разработка новых, равно как и модернизация существующих научно-технических решений, связанных с обработкой данных, удовлетворяющих поставленным требованиям качества и критериям к временным и ресурсным показателям процесса обработки данных, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Одними из первых научных работ в области нейронных сетей как специфической технологии искусственного интеллекта стали работы таких исследователей, как У. Маккалок и В. Питтс, Ф. Розенблатт, Д. Хебб. В дальнейшем результаты, полученные указанными исследователями, были расширены и углублены такими учёными, как С. Пейперт, М. Минский, Г. Саймон, Д. Хопфилд, Д. Хинтон. Существенного вклада в систематизацию информации по технологии нейронных сетей добились С. Хайкин и К. Бишоп.

Применение технологии нейронных сетей для моделирования финансовых данных (в том числе данных, представленных финансовыми временными рядами) отражено в работах В. Вея, Й.-К. Квона, Х. Циммерманна и других авторов.

Целью исследования является разработка моделей и инструментальных средств, предназначенных для поддержки принятия стратегических инвестиционных решений на базе обработки высокочастотных финансовых временных рядов методами искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели исследования в работе были решены следующие взаимосвязанные **задачи**:

– на основе анализа ключевых показателей ведущих национальных фондовых рынков определены критерии и разработан метод формирования групп стран по типу фондовых рынков, имеющих близкие значения по выбранным критериям, для создания информационной базы данных при осуществлении моделирования высокочастотных финансовых временных рядов;

– на основе современных подходов к моделированию на фондовых рынках разработана модель нейронной сети долгой краткосрочной памяти, представляющая собой инструментальное средство на базе искусственного интеллекта для исследования высокочастотных финансовых временных рядов;

– создана концепция повышения эффективности инструментов прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов доходностей. Данная концепция основана на применении разработанного автором критерия эффективности в форме индикатора оценки точности моделирования доходностей финансовых активов к результатам, полученным по созданной модели нейронной сети для разных групп национальных фондовых рынков;

– создан метод повышения доходностей высокочастотных сделок при торговле финансовыми активами для поддержки принятия решений на фондовом рынке. Данный метод базируется на разработанной модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти;

– на основе анализа торговых индикаторов осуществлён выбор индикаторов, наиболее чувствительных к изменению динамики высокочастотных временных рядов и обоснована разработка нового показателя в качестве сигнала к открытию (закрытию) торговой позиции;

– разработана автоматическая торговая система, позволяющая осуществлять высокочастотную торговлю финансовыми инструментами (фондовыми индексами). В качестве критерия принятия решения в данной системе

использован разработанный автором показатель открытия (закрытия) торговой позиции;

– на основе созданной автоматической торговой системы, индикатора открытия (закрытия) торговой позиции и оценённой модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти разработана система поддержки принятия решений для торговли на фондовом рынке.

Предметом исследования стал процесс формирования высокочастотных доходностей на фондовых рынках для принятия решений при проведении высокочастотных сделок.

Объектом исследования являлись фондовые рынки развитых и развивающихся стран.

Область исследования. Диссертация подготовлена в рамках пунктов 1.1. «Разработка и развитие математического аппарата анализа экономических систем: математической экономики, эконометрики, прикладной статистики, теории игр, оптимизации, теории принятия решений, дискретной математики и других методов, используемых в экономико-математическом моделировании», 1.4. «Разработка и исследование моделей и математических методов анализа микроэкономических процессов и систем: отраслей народного хозяйства, фирм и предприятий, домашних хозяйств, рынков, механизмов формирования спроса и потребления, способов количественной оценки предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений» Паспорта научной специальности 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики (экономические науки).

Научная новизна исследования состоит в постановке и решении научной задачи, имеющей важное экономическое значение и заключающейся в разработке новых способов обработки и моделирования данных, которые отличаются от существующих подходов тем, что исключают экспертный субъективизм при обработке данных и удовлетворяют критериям, предъявляемым к временным и ресурсным показателям процесса обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

– на основе выявленной специфики фондовых рынков, базирующейся на анализе ключевых показателей национальных фондовых рынков и критериях разделения национальных фондовых рынков на группы, предложен метод формирования информационной базы для моделирования динамики высокочастотных данных (С. 46-51);

– на основе анализа современных моделей прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов цен (доходностей) финансовых инструментов (в том числе фондовых индексов), торгуемых на фондовых рынках, создана модель нейронной сети долгой краткосрочной памяти для прогнозирования высокочастотных данных (С. 89-91; 95-96);

– разработаны концептуальные положения и метод использования созданной модели нейронной сети с целью повышения эффективности инструментов прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов доходностей. В качестве критерия эффективности выступает разработанный автором индикатор оценки точности моделирования доходностей финансовых активов. В отличие от предыдущих подходов разработанная концепция позволяет учесть особенности результатов моделирования в зависимости от типа рынка (С. 93-98);

– разработан индикатор, представляющий собой модификацию индикатора «индекс относительной силы» для использования в качестве критерия принятия решения при создании автоматической торговой системы (С. 122-123);

– усовершенствована система поддержки принятия решений при торговле активами на фондовом рынке, включающая в себя созданную автоматическую торговую систему с использованием критерия принятия решения и обученной модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти (С. 121-125).

Теоретическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для разработки новых и совершенствования существующих архитектур нейронных сетей, комбинаций их параметров, а также

механизмов обработки информации, которая используется нейронной сетью в качестве «входных» данных.

Практическая значимость работы заключается в том, что разрешён важный научно-практический вопрос: разработан инструментарий для моделирования высокочастотных финансовых временных рядов с целью обеспечения поддержки принятия решений при реализации инвестиционной стратегии. Указанная разработка имеет важное значение для решения практических задач, а именно: удалось получить достаточную точность прогнозирования будущих знаков доходности фондовых индексов и осуществить торговлю на высокочастотных данных с использованием стратегии, включающей в себя оценённую модель нейронной сети долгой краткосрочной памяти.

Методологию и методы исследования составляют фундаментальные положения и научно-методологические подходы к моделированию и прогнозированию высокочастотных финансовых временных рядов, а также разновидности такого инструментария искусственного интеллекта, как нейронные сети, сформулированные и представленные в работах отечественных и зарубежных учёных по анализу и прогнозированию временных рядов. Методологическая основа исследования состоит из методов системного, статистического, экономико-математического, сравнительного и финансового анализа.

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Данные по фондовым индексам, взятые из информационной системы «Bloomberg» и представляющие собой цены (котировки) индексов, и сведения по национальной макроэкономической статистике, взятые из информационного репозитория группы Всемирного банка, признаны достоверными. Методики научного исследования, осуществления расчётов и экономико-математического моделирования, использованные в ходе подготовки диссертации, признаны обоснованными. На основании изложенного результаты проведённых автором исследований можно считать достоверными.

Основные пункты научной новизны и выводы, сделанные в исследовании, апробированы на научно-практических мероприятиях:

на XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 08-12 апреля 2019 г.); на Международной научно-практической конференции «Международный опыт стимулирования развития микро-, малых и средних предприятий: возможности применения в России» (Москва, МГИМО МИД России, 28 ноября 2019 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Финансы и корпоративное управление в меняющемся мире» (Москва, Финансовый университет, 03 декабря 2019 г.); на Международном научном форуме «Наука и инновации – современные концепции» (Москва, Издательство «Инфинити», 24 апреля 2020 г.); на XXVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 10-27 ноября 2020 г.); на XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 12-23 апреля 2021 г.).

Материалы исследования используются в практической деятельности Лаборатории данных ООО «САС Институт». В частности, используются инструкция по созданию нейронной сети для анализа высокочастотных временных рядов и методика обработки указанных данных для применения в рамках созданной модели нейронной сети. По материалам исследования внедрена модель нейронной сети долгой краткосрочной памяти, позволившая улучшить точность и повысить качество прогнозирования высокочастотных данных. Выводы и основные положения исследования используются в практической работе Лаборатории данных ООО «САС Институт» и способствуют повышению качества оказываемых услуг.

Материалы исследования используются Департаментом математики Финансового университета в преподавании учебной дисциплины «Эконометрика».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. По теме исследования опубликовано 5 научных работ общим объёмом 3,63 п.л. (весь объём авторский) в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объём диссертации. Цель и задачи исследования определили структуру работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 144 наименования, и 2 приложений. Текст диссертации изложен на 155 страницах, включает 11 таблиц и 16 рисунков.

II Основное содержание работы

В первой главе диссертации дано определение понятию «ценообразование» и рассмотрены основные теоретические подходы к процессу ценообразования на фондовом рынке. Указаны положения, которые затруднительно или невозможно объяснить с позиции преобладавшего на протяжении длительного времени подхода к ценообразованию, представленного гипотезой эффективного рынка. Как следствие, это привело к возникновению новых теорий, объяснявших динамику стоимости активов на фондовом рынке.

В продолжение первой главы определены критерии и разработан метод формирования групп стран по типу фондовых рынков, имеющих близкие значения по выбранным показателям, для создания информационной базы исследования. В результате применения метода в каждой из сформированных групп было отобрано несколько стран по числу попаданий в список стран, имевших наибольшие значения по каждому показателю (стран-лидеров). С национальных фондовых рынков стран-лидеров были отобраны соответствующие фондовые индексы. Таким образом, была сформирована база исследования, представленная временными рядами одноминутных доходностей фондовых индексов. Список выбранных фондовых индексов представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Фондовые индексы развитых и развивающихся стран

Развитые страны		Развивающиеся страны	
Название индекса	Страна	Название индекса	Страна
S&P 500	США	SSE	Китай
NASDAQ Composite	США	S&P BSE allcap	Индия
NIKKEI 225	Япония	BSE SENSEX	Индия
DAX	Германия	Bovespa	Бразилия
S&P TSX	Канада	South Africa 40	ЮАР
Hangseng	Гонконг	VNINDEX	Вьетнам

Источник: составлено автором.

В ходе применения метода производилась группировка стран по уровню соответствия национальной экономики критериям для развитой или развивающейся экономики. Выбор стран, с фондовых рынков которых взяты фондовые индексы, определялся по значениям ряда количественных показателей, а именно:

- общая рыночная капитализация национальных фондовых рынков;
- рыночная капитализация национальных компаний, включённых в котировальные списки бирж;
- отношение объёма акций, торгуемых на национальных биржах, к валовому внутреннему продукту (ВВП) страны, в процентах;
- численность национальных компаний, включённых в котировальные списки бирж.

В завершение первой главы проведено сравнение эмпирического и теоретического законов распределения одноминутных доходностей фондовых индексов, исследуемых в работе. Выявлено, что эмпирические распределения доходностей наиболее точно описывались многопараметрическими законами распределения, в частности, обобщённым гиперболическим законом.

Во второй главе диссертации изложена концепция прогнозирования доходностей для осуществления торговли на базе высокочастотных финансовых временных рядов. В рамках содержания концепции описана специфика высокочастотных финансовых временных рядов в качестве данных для моделирования. Для увеличения эффективности высокочастотной торговли создан

метод повышения доходности торговли активами на фондовых рынках. В процессе реализации метода проведён критический анализ прикладных моделей, используемых для исследования высокочастотных данных. Модели объединены в следующие группы:

- 1) модели временных рядов (модели среднего и волатильности);
- 2) дифференциальные уравнения;
- 3) модели из области искусственного интеллекта (нейронные сети).

На основе критического анализа современных моделей прогнозирования высокочастотных данных создана модель нейронной сети для прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов доходностей. В качестве разновидности архитектуры созданной нейронной сети выбрана нейронная сеть долгой краткосрочной памяти (long short-term memory neural network, LSTM). В качестве её преимуществ над нейронными сетями других архитектур выделены следующие характеристики:

- способность обрабатывать значения с большими лагами;
- способность достаточно точно обрабатывать непрерывные, «зашумленные» данные;
- способность к обобщению вне зависимости от порядка и расположения входных значений сети;
- отсутствие необходимости «тонкой настройки» параметров сети.

Авторская новизна заключалась в конфигурации нейронной сети долгой краткосрочной памяти. Её структуру можно представить так:

- число блоков – 20;
- алгоритм оптимизации градиентного спуска – «Adam»;
- функция активации – гиперболический тангенс;
- параметр скорости обучения – [0,2; 0,3];
- квадратическая функция потерь.

С учётом необходимости повышения эффективности применения инструментов прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов

доходностей автором разработан метод использования модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти. Перед началом процесса обучения нейронной сети временной ряд доходности каждого фондового индекса, участвующего в исследовании, был разбит на обучающую, контрольную (тестовую) и валидационную выборки в соотношении 4:1:1. Длина обучающей выборки варьируется от 12993 (у индекса «S&P 500») до 30855 значений (у индекса «South Africa 40»). Она зависела от отражения периода работы каждой фондовой биржи в информационной системе «Bloomberg», которая выступала источником данных для работы нейронной сети и торговой стратегии автора. Данные для обучающей и контрольной выборки взяты за октябрь-декабрь 2019 г., а данные для валидационной выборки – за декабрь 2019 г. Данные из выборок не пересекались. С учётом вентилей, находящихся внутри блоков, общее число параметров сети не превышало 100.

В продолжение второй главы приведены концептуальные положения, отражающие сущность процесса оценки эффективности моделирования нейронной сетью данных, которые ранее не использовались в процессе её обучения. Эти положения основаны на разработанном автором критерии эффективности в виде индикатора оценки точности моделирования доходностей финансовых активов. Указанный индикатор представляет собой отношение среднеквадратической ошибки моделирования (относительной) к среднему значению доходности фондового индекса (СКО / СЗД). Его вид представлен в формуле (1)

$$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} / |\bar{y}| * 100\% , \quad (1)$$

где y_i – значение фактической доходности;

\hat{y}_i – значение доходности, полученное по модели;

$|\bar{y}|$ – среднее значение фактической доходности, взятое по модулю;

n – объём контрольной выборки.

По результатам оценки параметров сети и проверки их точности на контрольной выборке в соответствии с разработанным индикатором получены результаты, показанные в таблице 2.

Таблица 2 - Отношение среднеквадратической ошибки моделирования к среднему значению доходности, взятое с контрольных выборок доходностей фондовых индексов

В процентах

Индекс	СКО / СЗД
S&P 500	1,8
NASDAQ Composite	3,1
NIKKEI 225	18,63
DAX	28,18
S&P TSX	1,45
Hangseng	13,17
SSE	18,77
S&P BSE allcap	34
BSE SENSEX	8,55
Bovespa	9
South Africa 40	34,62
VNINDEX	3,24

Источник: составлено автором.

Полученные результаты достаточно существенно различались: по некоторым индексам средняя квадратическая ошибка составляла менее 7% от средней доходности (например, по индексам «S&P 500», «NASDAQ Composite» и «S&P TSX»), в то время как по другим индексам данное отношение превысило 30% (индексы «S&P BSE allcap» и «South Africa 40»). Такие различия присутствовали как по данным индексов развитых экономик, так и по данным индексов развивающихся экономик.

В качестве одного из этапов применения метода повышения доходности торговли активами на фондовых рынках протестирована способность обученной нейронной сети долгой краткосрочной памяти прогнозировать знаки величин доходности, ранее не передававшихся ей в качестве «входной» информации. С использованием обученной модели нейронной сети получены прогнозные знаки 90 будущих величин доходности, а затем полученные прогнозы сравнивались со знаками 90 величин доходности из валидационной выборки. Сравнение представляло собой процент совпадения знаков. В качестве конкурирующей

модели выбрана интегрированная модель авторегрессии и скользящего среднего ARIMA (p;d;q). Аналогичная процедура получения прогнозов знаков доходности проделана по модели ARIMA (p;d;q). Соответствующие результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Точность прогноза LSTM-сетью знака величин доходности из валидационных выборок доходностей фондовых индексов

В процентах

Индекс	Точность прогноза по модели LSTM-сети	Точность прогноза по модели ARIMA
S&P 500	71	53
NASDAQ Composite	66	52
NIKKEI 225	61	54
DAX	60	53
S&P TSX	68	51
Hangseng	60	60
SSE	58	62
S&P BSE allcap	55	57
BSE SENSEX	68	61
Bovespa	57	56
South Africa 40	61	51
VNINDEX	65	63

Источник: составлено автором.

Точность прогнозирования знаков будущих величин доходности индексов с помощью ARIMA-модели оказалась в среднем ниже, чем по модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти: 56% против 62,5%. Как следствие, модель LSTM-сети могла быть использована для анализа текущих и прогнозирования будущих приростов цен фондовых индексов.

В третьей главе диссертации проведена проверка утверждения о преимуществе применения модели LSTM-сети по сравнению с детерминированными моделями с постоянными значениями параметров при исследовании высокочастотных рядов доходности. В качестве альтернативной детерминированной модели выбрана модель простого скользящего среднего. В качестве периодов времени для модели простого скользящего среднего выбраны 20; 50 и 200 минут. При этом целью прогнозирования стало получение величины ошибки, показывающей средний квадрат отклонения фактических значений

доходности от модельных. Процесс обучения модели простого скользящего среднего проводился на обучающей выборке, процесс тестирования проходил на контрольной выборке, а затем сделан прогноз на 90 минут вперед, и проведено сравнение полученных прогнозов с фактическими значениями 90 величин доходности из валидационных выборок. Из полученных результатов следовало, что по 9 индексам из 12 LSTM-сети удалось предсказать значения доходности лучше, чем модели простого скользящего среднего.

В продолжение третьей главы даны возможные объяснения расхождений точности прогнозов, полученных во второй главе. Можно выделить следующие возможные причины расхождений:

1) лучшие результаты моделирования наблюдались по тем индексам, корреляция между доходностями которых имеет существенное или сильное значение. При тесном сходстве структур индексов и однородном характере факторов, оказывающих влияние на динамику индексов и акций отдельных компаний, входящих в их состав, наблюдалась более высокая точность моделирования;

2) точность моделирования и прогнозирования зависела от степени волатильности данных: менее волатильные данные точнее поддавались моделированию.

В продолжение реализации метода повышения доходностей высокочастотных сделок в рамках торговли активами усовершенствована система поддержки принятия решений при торговле активами на фондовом рынке. Модификация системы поддержки принятия решений заключается во включении в её состав таких элементов, как автоматическая торговая система (АТС), критерий принятия решения и обученная модель LSTM-сети. Система поддержки принятия решений разработана для использования в торговле фондовыми индексами. Созданная модель АТС относится к классу тренд-следящих АТС. Для определения сигнала на открытие или закрытие позиции в АТС использован критерий принятия решения. Он представляет собой модифицированный автором индикатор-осциллятор индекса относительной силы (relative strength index, RSI).

Модифицированный индикатор-осциллятор индекса относительной силы рассчитывается по формуле (2)

$$\text{MRSI} = 100 - \frac{100}{1 + \text{IIV}}. \quad (2)$$

Значение IIV (входное значение индикатора, input indicator value) представляло собой отношение произведений темпов роста к темпам падения цен, как показано в формуле (3)

$$\text{IIV} = \frac{\prod_{i=1}^n (1 + r_i^+)}{\prod_{i=1}^n (1 + r_i^-)}, \quad (3)$$

где r_i^+ – положительная доходность, с которой завершилась торговля в минуту i по сравнению с минутой $(i-1)$;

r_i^- – отрицательная доходность, с которой завершилась торговля в минуту i по сравнению с минутой $(i-1)$;

$E(\text{IIV}) \in [0; 100)$.

Правила использования модифицированного индикатора MRSI аналогичны правилам для обычного индикатора RSI. Выделяют два граничных значения: 30 и 70. Ниже отметки 30 находится зона «перепроданности»: попадание значения индикатора в эту зону свидетельствовало о том, что значения доходности, вероятно, скоро станут положительными (в случае использования обычного RSI это равносильно началу роста цены). Выше отметки 70 находится зона «перекупленности»: попадание значения индикатора в эту зону свидетельствовало о том, что значения доходности, вероятно, скоро станут отрицательными (в случае использования обычного RSI это равносильно началу падения цены).

Связь между АТС и LSTM-сетью заключалась в том, что нейронная сеть «включалась» в торговую стратегию, когда значение индикатора находилось в зоне «неопределённости», то есть между линиями 30 и 70. В случае необходимости совершения сделки в ближайшее время и при условии, что значение индикатора MRSI находилось в зоне «неопределённости», трейдер мог:

- 1) запустить модель нейронной сети и оценить её параметры на имеющихся данных;
- 2) сделать прогноз на h минут вперед;
- 3) проанализировать прогнозные значения, полученные с помощью нейронной сети, и при наличии устойчивых тенденций в прогнозе принять решение о покупке (продаже) индекса или отказаться от совершения торгового действия.

Порядок работы с созданной системой поддержки принятия решений представляет собой последовательность следующих действий:

- 1) выбрать данные по ценам и трансформировать их в логарифмические доходности;
- 2) получить значения индикатора MRSI по выбранным данным;
- 3) если значения индикатора находятся в зоне «определённости», то принять торговое решение согласно полученному значению индикатора;
- 4) если значение индикатора находится в зоне «неопределённости», при необходимости применить оценённую модель LSTM-сети для получения прогнозных значений доходности и, в случае наличия в прогнозе устойчивых тенденций, принять торговое решение. В случае отсутствия в прогнозе устойчивых тенденций отказаться от торговой активности.

Тестирование системы поддержки принятия решений (при описании процесса применения системы поддержки принятия решений на практике используется понятие «торговая стратегия») проводилось на одноминутных доходностях фондовых индексов, не использовавшихся при обучении и проверке качества работы нейронной сети. Период тестирования представлял собой интервал времени с декабря 2019 г. по январь 2020 г. В качестве бенчмарка для сравнения доходности авторской торговой стратегии выбрана торговая стратегия «buy-and-hold». Следуя данной стратегии, инвестор приобретал актив в начале торгового периода и продавал его в момент завершения торговли. В таблице 4 приведены финансовые результаты от торговли согласно авторской торговой стратегии и стратегии «buy-and-hold».

Таблица 4 - Финансовый результат торговой стратегии автора и стратегии «buy-and-hold» при торговле фондовыми индексами развитых и развивающихся стран в период с декабря 2019 г. по январь 2020 г.

В процентах

Индекс	Доходность стратегии автора	Доходность стратегии «buy-and-hold»
S&P 500	2,84	0,07
NASDAQ Composite	-0,99	0,26
NIKKEI 225	0,77	-0,76
DAX	12,13	-0,12
S&P TSX	1,18	0,39
Hangseng	-1,91	0,24
SSE	1,82	0,10
S&P BSE allcap	-0,96	-0,01
BSE SENSEX	0,50	0,48
Bovespa	0,75	0,73
South Africa 40	-4,89	0,15
VNINDEX	0,06	-0,03

Источник: составлено автором.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать несколько выводов. Во-первых, общий результат торговли заключался в том, что по 8 фондовым индексам из 12 доходность авторской торговой стратегии превысила доходность стратегии-бенчмарка «buy-and-hold». Только по индийскому фондовому индексу «S&P BSE allcap» торговля завершилась с убытком по обеим стратегиям. По 4 из 5 оставшихся фондовых индексов развивающихся стран авторская торговая стратегия принесла более предпочтительный финансовый результат. Аналогичная ситуация наблюдалась по 4 из 6 фондовых индексов развитых стран.

Во-вторых, сопоставляя результаты от торговли с полученными ранее данными по оценке качества моделирования LSTM-сетью данных из контрольной выборки, можно заметить, что более высокую доходность можно получить при торговле теми фондовыми индексами, которые имеют более высокую ошибку моделирования. Например, в группе индексов развитых стран наибольшая доходность в 12,13% получена при торговле индексом «DAX», который имел самую высокую ошибку моделирования, составившую 28,18%, в этой группе.

Среди индексов развивающихся стран наилучший результат от торговли размером в 1,82% доходности зафиксирован по индексу «SSE», который имел третью по величине ошибку моделирования, составившую 18,77%, среди фондовых индексов развивающихся стран.

III Заключение

В работе исследована способность нейронной сети долгой краткосрочной памяти моделировать данные с высокочастотных финансовых временных рядов, представляющие собой одноминутные логарифмические доходности фондовых индексов развитых и развивающихся стран. Для подготовки базы исследования выделены критерии и разработан метод формирования групп стран по типу фондовых рынков, которые имеют близкие значения по выделенным критериям. Информационная база исследования представлена высокочастотными временными рядами доходностей фондовых индексов развитых и развивающихся стран. Ввиду существования автокорреляции значений доходностей и изменения её величины с течением времени принято решение использовать нейронную сеть долгой краткосрочной памяти для моделирования значений доходности фондовых индексов и прогнозирования знаков их будущих величин. Нейронная сеть с такой архитектурой создана в ходе реализации метода повышения доходности торговли активами на фондовых рынках. В её архитектуру заложена возможность фильтрации данных, что позволяет использовать для моделирования и прогнозирования релевантную информацию и соответствует принципу постепенного устаревания и снижения ценности информации на фондовом рынке.

В рамках применения метода использования созданной модели нейронной сети проведено моделирование доходностей фондовых индексов с национальных фондовых рынков и оценена точность такого моделирования с использованием индикатора, разработанного автором. Затем получены прогнозы знаков будущих величин доходности по всем исследуемым фондовым индексам.

По результатам моделирования и прогнозирования доходностей выбранных фондовых индексов сделаны следующие выводы:

– наблюдалась связь между степенью волатильности и точностью моделирования доходностей фондового индекса. Индексы с более низкими значениями коэффициента вариации лучше поддавались моделированию, соответствующие результаты являются более точными;

– наблюдалась связь между степенью волатильности и точностью прогнозирования знаков доходностей фондового индекса. Наиболее точные прогнозы сделаны по индексам с более низкой степенью волатильности;

– результаты моделирования данных внутри каждой из групп не являлись однородными. Как среди индексов развитых экономик, так и среди индексов развивающихся экономик выявлены существенные расхождения в точности моделирования. С учётом анализа матрицы парной корреляции сделан вывод о том, что более точные результаты наблюдаются по индексам, корреляция между доходностями которых имеет существенное или сильное значение. Иными словами, при более сильном сходстве структур индексов и однородном характере факторов, оказывавших влияние на динамику индексов и акций отдельных компаний, входящих в их состав, наблюдалась более высокая точность прогнозирования;

– точность прогнозирования знаков будущих величин доходности фондовых индексов варьировалась от 55% до 71%. Средняя точность прогнозов в группе индексов развитых экономик выше, чем в группе индексов развивающихся экономик. При этом точность прогнозов внутри самих групп не являлась однородной;

– по сравнению с интегрированной моделью авторегрессии и скользящего среднего ARIMA (p;d;q) нейронная сеть долгой краткосрочной памяти дала более точные результаты прогнозирования знаков будущих величин доходности. Это наблюдалось по 9 индексам из 12. Аналогичные результаты получены при сравнении результатов прогнозирования самих величин доходности,

полученных по модели нейронной сети долгой краткосрочной памяти, с результатами, полученными по модели простого скользящего среднего.

Автором усовершенствована система поддержки принятия решений, представляющая собой комбинацию автоматической торговой системы, критерия принятия решения и обученной модели нейронной сети. Подготовленная система поддержки принятия решений протестирована на данных по всем 12 фондовым индексам в виде торговой стратегии. По завершении тестирования приведены результаты торговли, выраженные финансовым результатом по авторской стратегии и по альтернативной стратегии «buy-and-hold». Авторская стратегия принесла прибыль при торговле по 8 фондовым индексам из 12 и, как следствие, превзошла консервативную стратегию «buy-and-hold».

В качестве перспектив дальнейшего исследования можно отметить, что построенная модель нейронной сети может быть использована для углубления понимания механизма функционирования фондового рынка. В частности, более подробного рассмотрения заслуживают алгоритмы адаптивной фильтрации, позволяющие избавиться от «шумовой» компоненты. Следует добавить, что параметры и характеристики наиболее точных моделей нейронных сетей также могут быть использованы в областях, смежных с фондовыми рынками, для объяснения механизма действий лица, принимающего решения.

IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных изданиях,
определённых ВАК при Минобрнауки России:*

1. Лабусов, М.В. Обзор моделей анализа и прогнозирования высокочастотных финансовых временных рядов / М.В. Лабусов // Экономика и предпринимательство. – 2019. – № 6 (107). – С. 1256-1258. – ISSN 1999-2300.

2. Лабусов, М.В. Нейронные сети долгой краткосрочной памяти и их использование для моделирования финансовых временных рядов /

М.В. Лабусов // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 3. – С. 167-171. – ISSN 2307-180X.

3. Лабусов, М.В. Прототипирование автоматической торговой системы для торговли на высокочастотных данных / М.В. Лабусов // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 9 (122). – С. 1218-1222. – ISSN 1999-2300.

4. Лабусов, М.В. Подготовка торговой системы на рынке акций / М.В. Лабусов // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 12 (125). – С. 1058-1060. – ISSN 1999-2300.

5. Лабусов, М.В. Анализ краткосрочных финансовых временных рядов с помощью нейронных сетей долгой краткосрочной памяти / М.В. Лабусов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – № 4 (112). Том 3. – С. 165-177. – ISSN 2227-3891.