

DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-38-51

УДК 336.74(045)

JEL F47, G17, F63

Методические подходы к прогнозированию динамики курса криптовалют с применением инструментов стохастического анализа (на примере биткоина)

М.Р. Сафиуллин,

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0003-3708-8184>

А.А. Абдукаева,

Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0003-1262-5588>

Л.А. Ельшин,

Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0002-0763-6453>

АННОТАЦИЯ

Ускоренные темпы развития рынка криптовалюты и его интеграция в систему хозяйственных, операционных, финансовых и других процессов определяют необходимость комплексного изучения данного явления. Особую актуальность этому придает то, что на государственном уровне в последние месяцы активизировались обсуждения относительно перспектив легализации рынка криптовалюты и возможностей использования его инструментов в хозяйственной деятельности экономических агентов. Несмотря на порой полярные взгляды и подходы, сформировавшиеся на текущий момент среди российских экспертов относительно решения данного вопроса, развитие крипторынка происходит крайне высокими темпами вне зависимости от его регулирования. Это обуславливает и актуализирует проведение научных изысканий в области оценки перспектив развития данного рынка, формирующих предмет настоящего исследования с целью предсказания возможных эффектов и рисков для национальной экономической системы.

Цель статьи – разработка инструментария, направленного на решение вопросов в части моделирования и прогнозирования волатильности рынка криптовалюты на основе «предвидения» перспективных колебаний стоимости «цифровых денег» с использованием специальных моделей авторегрессии (ARMA, ARIMA).

Исследование базируется на использовании класса параметрических моделей, позволяющих описывать как стационарные, так и нестационарные временные ряды и на этой основе разрабатывать систему прогностических оценок относительно перспектив дальнейшего развития исследуемого ряда.

При помощи полученной модели ARIMA, оценивающей параметры анализируемого ряда, характеризующего курс криптовалюты, разработана система прогностических оценок на краткосрочный период.

Доказано, что использование подобного рода моделей с высоким уровнем достоверности предсказывает будущие корректировки на исследуемом рынке, что обуславливает высокий уровень перспективности их использования при моделировании будущих параметров развития рынка криптовалюты. Это создает основу для выработки механизмов адаптации хозяйствующих субъектов к формирующимся корректировкам ценовых индексов «цифровых денег».

Ключевые слова: рынок криптовалюты; биткоин; стохастический анализ; прогнозирование; модели авторегрессии

Для цитирования: Сафиуллин М.Р., Абдукаева А.А., Ельшин Л.А. Методические подходы к прогнозированию динамики курса криптовалют с применением инструментов стохастического анализа (на примере биткоина). *Финансы: теория и практика*. 2018;22(4):38-51. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-38-51



DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-38-51
UDC 336.74(045)
JEL F47, G17, F63

Methodological Approaches to Forecasting Dynamics of Cryptocurrencies Exchange Rate Using Stochastic Analysis Tools (on the Example of Bitcoin)

M.R. Safullin,

Kazan (Privolzhsky) Federal University, Kazan, Russia
<https://orcid.org/0000-0003-3708-8184>

A.A. Abdukaeva,

Center for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia
<https://orcid.org/0000-0003-1262-5588>

L.A. El'shin,

Center for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia
<https://orcid.org/0000-0002-0763-6453>

ABSTRACT

The accelerated pace of development of the cryptocurrency market and its integration into the system of economic, operational, financial and other processes determines the need for a comprehensive study of this phenomenon. This is particularly relevant because in recent months, at the state level have intensified discussions on the prospects of the legalization of the cryptocurrency market and the possibility of using its tools in the economic activities of economic agents. Despite the sometimes polar views and approaches at the moment among Russian experts regarding the solution to this issue, the development of the crypto-currencies market is extremely high, regardless of its regulation. This determines and actualizes the scientific research in the field of evaluation of the prospects of development of this market, forming the subject of this study in order to predict the possible effects and risks for the national economic system. The purpose of the article is the development of tools of modelling and forecasting the volatility of the cryptocurrency market on the basis of "foreseeing" fluctuations in the value of "digital money" using special models of autoregression (ARMA, ARIMA). The study was based on the application of a class of parametric models. It allowed describing both stationary and non-stationary time series and on this basis to develop a system of prognostic estimates for the prospects of further development of the series under study. With the help of our ARIMA model, which evaluates the parameters of the analyzed time series of the cryptocurrency exchange rate, we developed a system of prognostic assessments for the short term. The authors proved that the application of such models with a high level of reliability predicts future adjustments in the market under study. It leads to a high level of prospects for their use in modelling future parameters of the cryptocurrency market development. This creates a basis for a business to develop adaptive mechanisms for to emerging price index adjustments of "digital money".

Keywords: cryptocurrency market; bitcoin; stochastic analysis; forecasting; autoregression models

For citation: Safullin M.R., Abdukaeva A.A., El'shin L.A. Methodological approaches to forecasting dynamics of cryptocurrencies exchange rate using stochastic analysis tools (on the example of bitcoin). *Finansy: teoriya i praktika = Finance: Theory and Practice*. 2018;22(4):38-51. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-4-38-51

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня наблюдается глубокая трансформация традиционного мира денег и финансов. Инновации в финансовом секторе, новые технологии, инструменты и системы влекут за собой глубокие изменения привычных нам финансовых институтов. Одним из важнейших этапов этих трансформационных процессов стало появление криптовалют, сопровождаемое стремительным развитием связанных с ними технологий и отсутствием четкой картины будущего ландшафта экосистем.

На сегодняшний день государства демонстрируют неоднозначное отношение к криптовалютам. Анализ подходов стран к регулированию криптовалютных рынков показал, что единой позиции в отношении правового статуса рассматриваемого вида цифровых денег на сегодняшний день в мировом сообществе не выработано. Нет также и единого определения самого понятия цифровых денег, а следовательно, и инструменты его регулирования меняются в разных странах и институтах в пределах одних территориальных границ. Единственным вопросом, в отношении которого в позициях стран прослеживается единодушие, это необходимость создания сбалансированной нормативно-правовой базы, определения мер и инструментов для предотвращения использования криптовалют в преступных целях [1, с. 345–365].

Правовой статус криптовалют значительно различается в разных странах. Многие из них рассматривают цифровую валюту как товар или инвестиционный актив. Ряд стран признал криптовалюту в качестве расчетной денежной единицы (например, Япония). В других странах операции с криптовалютами запрещены для организаций, но разрешены для физических лиц [2, с. 117–130].

На сегодняшний момент можно однозначно констатировать, что в мировом сообществе единый (унифицированный) подход к правовому регулированию криптовалютных отношений все еще не выработан. В то же время криптовалюта рассматривается многими мировыми регуляторами в качестве перспективного инструмента в денежно-кредитной политике национальных экономик.

ОБЗОР ЛЕГАЛИЗАЦИИ МИРОВОГО РЫНКА КРИПТОВАЛЮТЫ

С целью выявления тенденции, демонстрирующей отношение стран к криптовалюте, а также для получения более подробного состояния правового статуса в различных странах был проведен анализ, отражающий статус криптовалюты за каждый квартал с 2013 по 2017 г. в 29 странах.

За основу принята следующая система оценок правового статуса криптовалют:

- 1 — негативное отношение к криптовалютам / полный запрет;
- 0 — статус криптовалюты не определен;
- 0,5 — рассматривается вопрос о легализации;
- 1 — признана частными деньгами, товаром, активом;
- 2 — законодательно признана, облагается налогом.

Результаты представлены на *рис. 1* и в *табл. 1*.

Реализованный анализ показывает, что в большинстве государств правовой статус криптовалют является дискуссионным и нерегулированным. Вместе с тем, несмотря на разнородность отношения национальных государств к рынку криптовалюты, последний, судя по данным из *рис. 1*, демонстрирует поступательный положительный тренд вследствие набирающих обороты тенденций его легализации в различных странах мира (средние из полученных оценок за каждый квартал образуют временной ряд с ярко выраженным линейным трендом). Это позволяет сделать вывод о том, что с каждым анализируемым периодом уровень доверия мирового сообщества к криптовалютам растет.

Криптовалюта становится неотъемлемой частью современного мира и имеет огромное влияние на экономику стран и в целях понимания последствий расширения данного рынка представляется крайне целесообразной и актуальной выработка соответствующего методологического инструментария, который бы позволил предвидеть возможные последствия и риски легализации «цифровых денег» [3, с. 88–91].

Следует заметить, что, по данным P2P сервиса, среднее значение еженедельного объема сделок по покупке и продаже биткоина за российский рубль в 2017 г. составило 603, 32 млн руб. (*рис. 2*)¹. При этом, несмотря на весьма значительные объемы и темпы их роста, можно утверждать, что на текущий момент времени в России инвестиционной функции криптовалюты не существует ввиду отсутствия инструментов ее использования в качестве платежа / мены в сфере товарооборота. Легализация криптовалюты, посредством ее законодательного / нормативного закрепления в правовом поле страны открывает возможность проведения товарообменных операций посредством применения криптовалютных транзакций, тем самым формируя значительные

¹ Сервис статистической информации о биткоине. URL: <https://coin.dance/volume/localbitcoins/RUB> (дата обращения: 17.05.2018).



Рис. 1 / Fig. 1. Средние оценки правового статуса криптовалют / Average estimations of the legal status of the crypto-currencies

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

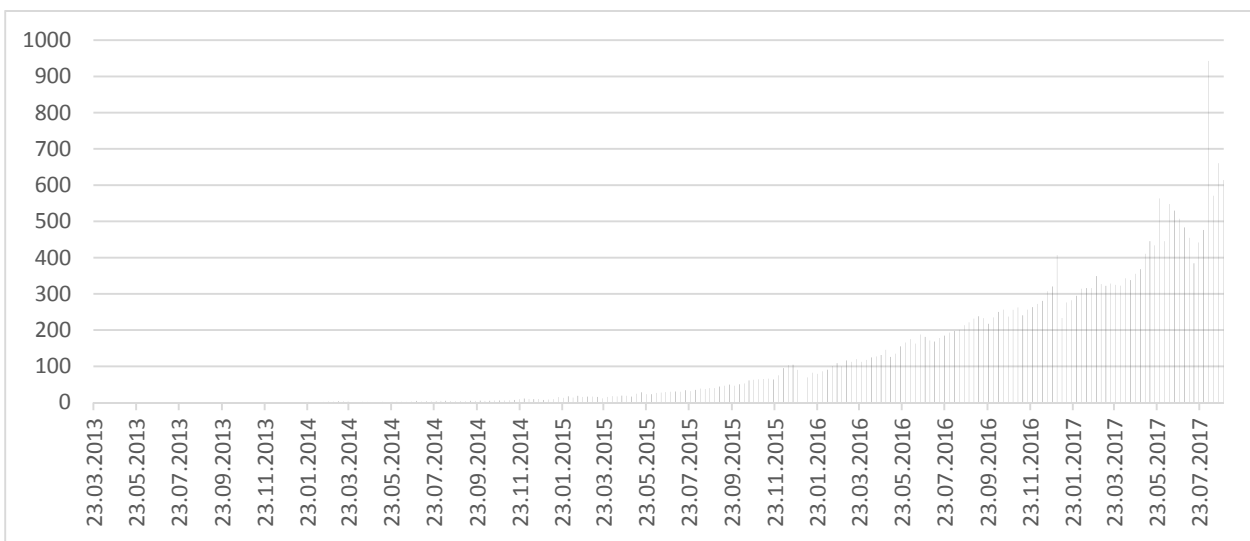


Рис. 2 / Fig. 2. Еженедельный объем оборота Bitcoin в РФ, млн руб. [5, с. 91–94] / Weekly turnover of bitcoin in the Russian Federation, mln RUB [5, pp. 91–94]

эффекты притока криптовалюты из-за рубежа. Особенно актуальным это представляется в условиях санкционного давления на национальные экономические системы, выраженного, в частности, в ограничении доступа иностранных инвестиций на суверенные государственные финансовые рынки через традиционные институты их регулирования (банковские транзакции). Учитывая эффекты и известные инструменты, выраженные в возможности конвертации криптовалюты посредством биржевых торгов в традиционные денежные знаки,

легализация рассматриваемого рынка открывает широкие возможности генерации инвестиционной функции и формирование соответствующих макроэкономических и иных эффектов. При этом важным аспектом здесь является то, что рост инвестиционной активности в результате легализации рынка криптовалюты будет формироваться преимущественно в несырьевых секторах экономики [4, с. 82–90].

Исходя из вышеизложенного с определенной долей уверенности можно утверждать, что динамика

Таблица 1 / Table 1

Анализ правового статуса криптовалют / Analysis of the legal status of crypto-currencies

Страна	2013				2014				2015				2016				2017			
	I кв. / Q1	II кв. / Q2	III кв. / Q3	IV кв. / Q4	I кв. / Q1	II кв. / Q2	III кв. / Q3	IV кв. / Q4	I кв. / Q1	II кв. / Q2	III кв. / Q3	IV кв. / Q4	I кв. / Q1	II кв. / Q2	III кв. / Q3	IV кв. / Q4	I кв. / Q1	II кв. / Q2	III кв. / Q3	IV кв. / Q4
Российская Федерация / Russian Federation	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Германия / Germany	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Хорватия / Croatia	0	0,5	0,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Дания / Denmark	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Швеция / Sweden	0	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Южная Корея / South Korea	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Япония / Japan	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Таиланд / Thailand	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Китай / China	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
США / USA	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Сингапур / Singapore	0	0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Болгария / Bulgaria	0	0	0,5	0,5	0,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Норвегия / Norway	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Украина / Ukraine	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Франция / France	0	0	0	-1	-1	-1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Индия / India	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Австралия / Australia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Бельгия / Belgium	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Канада / Canada	0	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Хорватия / Croatia	0,5	0,5	0,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Кипр / Cyprus	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Дания / Denmark	0	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Гонконг / Hong Kong	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Израиль / Israel	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Япония / Japan	0	0	0	-1	-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Новая Зеландия / New Zealand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Словения / Slovenia	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Испания / Spain	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Великобритания / Great Britain	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Болгария / Bulgaria	0	0	0	0,5	0,5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

развития глобального рынка криптовалюты в последние годы, имеющая экспоненциальный характер, существенным образом актуализирует вопросы научно-исследовательского характера, направленные на изучение последствий, вызванных интеграцией криптотранзакций в хозяйственный оборот экономических агентов. Интеграция глобального рынка криптовалюты в хозяйственный оборот национальных экономических систем трансформирует привычные механизмы регулирования. Рост рынка криптовалют увеличивает давление на денежное обращение, что соответствующим образом отражается на национальной экономике в целом [6–8]. В связи с этим представляется актуальным исследование основных направлений, ограничивающих или, наоборот, расширяющих диапазон регулирования финансовых рынков и развития национальной платежной системы вследствие интеграции бизнес-процессов в «криптопространство». Целесообразность данного исследования во многом обусловлена тем, что любое нарушение институциональной действительности, основанной на традиционных инструментах регулирования, может повлечь за собой определенного рода последствия, выраженные, к примеру, в нарушении финансовой стабильности, что, несомненно, отразится и на развитии реальных секторов экономики.

Следует заметить, что на текущий момент времени, даже несмотря на экспоненциальный рост мирового рынка криптовалюты в последние годы, многими экономистами и государственными деятелями фактор его влияния на макроэкономическую и финансовую стабильность не рассматривается как значимый. Основой данного подхода является крайне низкий объем крипторынка в общем балансе платежной системы. К примеру, в Российской Федерации еженедельный оборот Bitcoin составляет всего 0,006% наличности и 0,001% денежной массы [9, с. 553–571].

Вместе с тем в обозримом будущем весьма вероятен сценарий, предусматривающий дальнейшую активизацию исследуемого рынка и его многоукладную интеграцию в национальные экономические системы, что обуславливает необходимость уже сегодня обратить на данный вопрос самое пристальное внимание со стороны научного и экспертного сообщества. Существенный вклад в ускоренный рост капитализации глобального рынка криптовалюты может внести не только его популяризация как прогрессивного инструмента, используемого в транзакционных операциях, но и дальнейший рост обменного курса [как вследствие фактора, выраженного в ограниченной эмиссии криптовалюты (к примеру, эмиссия Bitcoin ограничена 21 млн

единиц), так и вследствие спекулятивных операций на криптобиржах] [10–11].

МЕТОДЫ

В связи с вышеизложенным на текущий момент времени представляется крайне актуальной задача поиска и разработки специального инструментария, позволяющего предвидеть и прогнозировать корректировки обменных курсов современных «цифровых денег».

Необходимо отметить, что в научном публикационном пространстве крайне редко можно встретить работы, посвященные этой тематике. Преимущественно в них рассматриваются вопросы исследовательского характера, направленные либо на экспертную оценку текущих и предстоящих перспектив развития рассматриваемого рынка, либо на использование специальных методов биржевого технического анализа, раскрывающего особенности и тренды курсовых колебаний «цифровых денег».

Вместе с тем представляется целесообразным, в рамках проведения научно-исследовательских мероприятий, использование специальных методов экономико-математического моделирования, предусматривающих применение прогрессивных инструментов и механизмов.

Отсутствие монетарного органа, уполномоченного на поддержание стабильности денежной системы, приводит к сильной волатильности курса криптовалют. Курс относительно к твердым деньгам формируется исключительно за счет спроса и предложения на криптовалюту, следовательно, ежедневные колебания курса могут превышать 25% [12].

Это отрицательно влияет на использование ее в качестве расчетной валюты в торговых операциях и порождает мотивацию для спекуляции. К тому же прогнозировать изменение курса — весьма нетривиальная задача. Использование фундаментального анализа для прогнозирования волатильности биржевых котировок неэффективно, так как курс не зависит от экономики определенной страны; использование технического анализа также неэффективно, так как невозможно определить состояние рынка в силу формирования спроса и предложения за счет лиц, готовых купить либо продать определенные товары или услуги по всему миру [12].

На наш взгляд, одним из действенных механизмов прогнозирования временных финансовых рядов является использование моделей авторегрессии скользящего среднего (ARMA, ARIMA). Особую актуальность данный подход приобретает в условиях отсутствия на текущий момент времени эффективных инструментов прогнозирования курсовых колебаний подобного

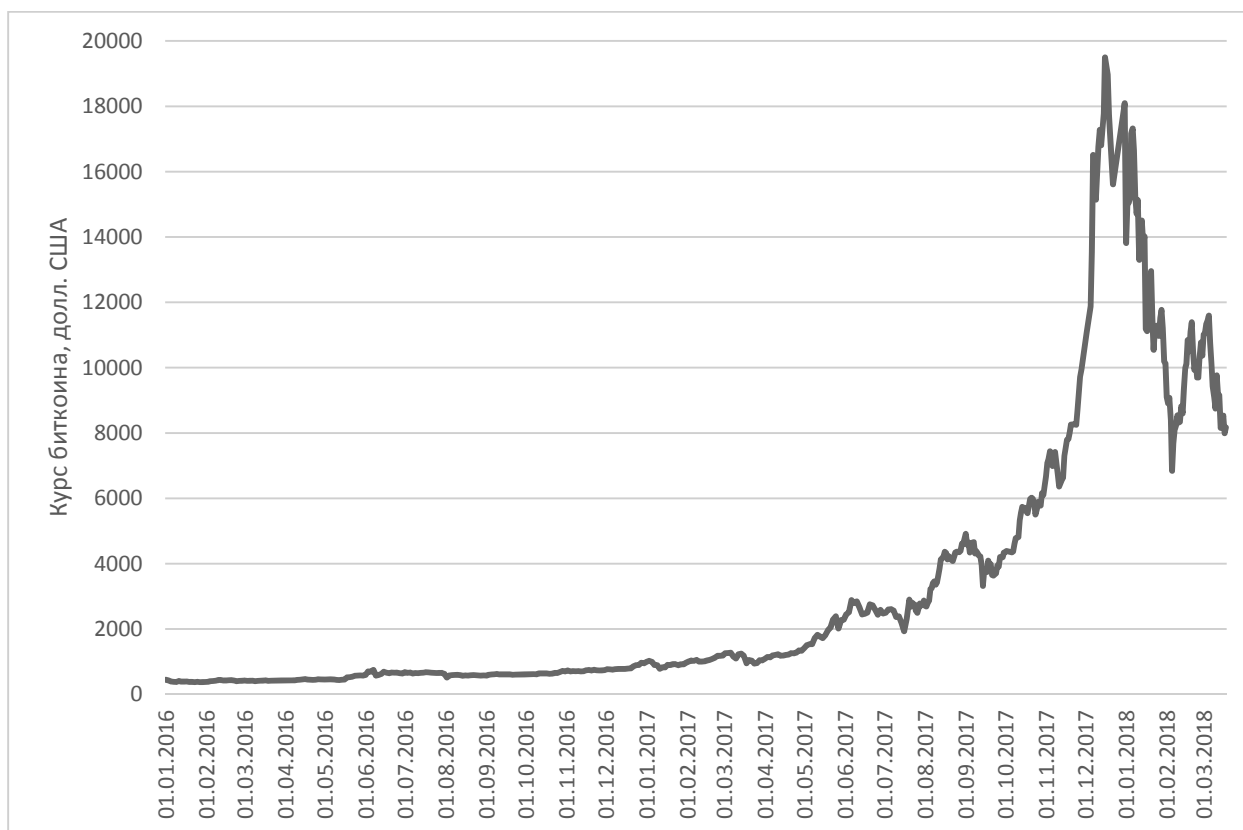


Рис. 3 / Fig. 3. Динамика изменения курса криптовалюты биткоин в период с 01.10.2016 по 04.03.2018 г. в долл. США / Dynamics of the change in the rate of the crypto currency bitcoin in the period from 01.10.2016 to 04.03.2018 in USD

Источник / Source: <https://blockchain.info>.

рода «финансовых активов», характеризующихся неравномерностью колебаний курсов во времени, отсутствием «привязки» к базовым активам, высоким уровнем спекулятивного спроса и т.п.

Модели ARMA, ARIMA — это важный класс параметрических моделей, позволяющих описывать как стационарные, так и нестационарные ряды. Целью данной работы является выявление модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего с минимально необходимым порядком параметров, на основе которой можно совершать достоверные краткосрочные прогнозы волатильности криптовалюты.

Эмпирический и экспертный анализ продемонстрировал целесообразность использования в качестве объекта исследования криптовалюту bitcoin. Это обусловлено рядом причин, главные из которых представлены ниже:

- доминирующая доля bitcoin в общей мировой капитализации криптовалют (около 45%)²;

² URL: <https://coinmarketcap.com/coins/>(дата обращения: 26.07.2018).

- это наиболее популярная криптовалюта, колебания курса которой всецело обуславливают волатильность абсолютного большинства других видов криптовалют.

Возвращаясь к вопросам методологического характера, следует заметить, что использование рассматриваемых в работе моделей предполагает реализацию пяти основных итераций:

1. Построение временного ряда.
2. Проверка ряда на стационарность (в результате чего определяется класс используемой модели — ARMA или ARIMA).
3. Подбор параметров модели.
4. Оценка достоверности и адекватности построенной модели.
5. Разработка прогностических параметров исследуемого временного ряда.

Процесс моделирования применительно к объекту исследования, рассматриваемого в настоящей работе, представлен ниже с подробным изложением последовательности решаемых итераций.

Расчеты проводились для данных, отражающих динамику курса криптовалюты биткоин. Ряд опи-

Таблица 2 / Table 2

Результаты ADF-теста / Results of the ADF test

		t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-0,742350	0,8334
Test critical values:	1% level	-3,44416	
	5% level	-2,86752	
	10% level	-2,57002	

Примечание. * MacKinnon (1996) one-sided p-values.
 Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

сывает стоимость биткоина в период с 01.10.2016 по 18.03.2018 г. (рис. 3). Источником данных послужил сервис виртуальных биткоин-кошельков "Blockchain.info"³. Расчеты проводились с помощью прогнозного аналитического ПО Eviews, IBM SPSS.

Моделирование стационарных временных рядов или рядов, которые могут быть приведены к стационарным, может быть произведено при помощи класса моделей авторегрессии скользящего среднего (ARMA), которая является комбинацией двух моделей: авторегрессии порядка *p* и скользящего среднего порядка *q*. В обобщенном виде модель ARMA (*p*, *q*) выглядит следующим образом:

$$Y_t = a_0 + a_1 X_{t-1} + a_2 X_{t-2} + \dots + a_n X_{t-n} + \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t-1} - \beta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \beta_n \varepsilon_{t-n}. \quad (1)$$

Для нестационарных данных Боксом и Дженкинсом предложена модель ARIMA (*p*, *d*, *q*), которая после взятия *d* последовательных разностей может быть приведена к стационарному виду [13], где *p*, *d*, *q* — структурные параметры, характеризующие порядок для соответствующих частей модели — авторегрессионной, интегрированной и скользящего среднего.

Методология подбора модели состоит из нескольких этапов.

1. Идентификация модели

На первоначальном этапе исследования необходимо выяснить, обладает ли изучаемый ряд свойством стационарности.

Стационарный ряд — это ряд, поведение и свойства которого в настоящем и будущем совпадают с поведением в прошлом.

Оценка стационарности ряда может проводиться при помощи различных методов. Базовыми способами проверки стационарности ВР является рас-

ширенный тест Дики–Фуллера, а также построение автокорреляционной функции (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ). Расчет автокорреляционной функции производится по следующей формуле:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \frac{cov(k)}{var} = \frac{cov(y_t; y_{t-k})}{var(y_t)}; |\rho_k| \leq 1. \quad (2)$$

Частная автокорреляционная функция (PACF или ЧАКФ) определяется как частная корреляция между значениями *Y_t* и *Y_{t-k}* — «очищенная» от влияния на них промежуточных переменных [14–16].

Для исходного ряда были построены АКФ и ЧАКФ (рис. 4).

Построенная АКФ характеризуется замедленным убыванием коэффициентов автокорреляционной функции по угасающей экспоненте от значения коэффициента, близкого к единице. ЧАКФ имеет высокое значение коэффициента автокорреляции на первом лаге и близкие к 0 значения на последующих лагах.

Таким образом, можно сделать вывод о нестационарности исходного временного ряда.

Кроме визуального анализа, для проверки стационарности временного ряда был проведен расширенный тест Дики–Фуллера (ADF-тест). Он заключается в проверке нулевой гипотезы о наличии единичного корня в уравнении

$$y_t = \alpha y_{t-1} + \varepsilon_t.$$

Решение о стационарности ВР принимается в случае, если рассчитанные оценки теста больше статистики *t_{набл}* (*t_{набл}* > *t_{крит}*). Результаты теста представлены в табл. 2.

Для исследуемого ряда *t_{набл}* = -0,74. Так как полученные значения при различных уровнях значимости (1, 5 и 10%) имеют значения меньше, чем *t_{набл}*, то принимается гипотеза о нестационарности ВР.

³ Сервис виртуальных биткоин-кошельков. URL: <https://blockchain.info/ru/> (дата обращения: 26.07.2018).

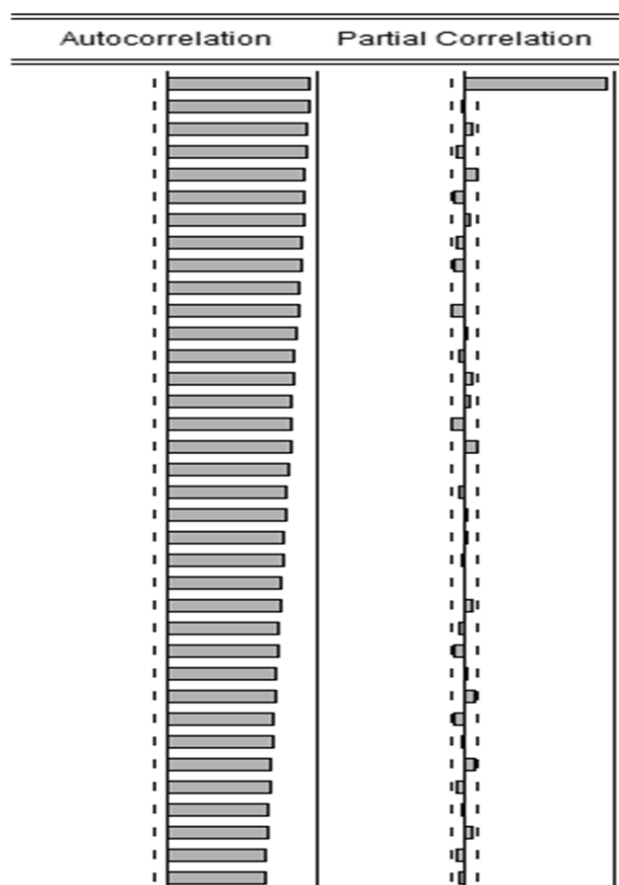


Рис. 4 / Fig. 4. Автокорреляционная функция (Autocorrelation). Частная автокорреляционная функция (Partial Correlation). Сгенерирована в программе SPSS / Autocorrelation. Partial Correlation. It is generated in the SPSS program

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

Таким образом, моделирование курса криптовалюты биткоин было проведено на основе модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС или ARIMA).

2. Критерии подбора параметров модели

После выбора модели необходимо подобрать параметры. После взятия первой разности исходный ряд был приведен к стационарному виду, таким образом, параметр $d = 1$.

Для моделирования динамики изменения курса криптовалют были протестированы следующие модели ARIMA (1, 1, 1), ARIMA (1, 1, 2), ARIMA (2, 1, 0) ARIMA (2, 1, 1), ARIMA (2, 1, 2).

Основанием для выбора модели послужили построенные АКФ и ЧАКФ функции, а также рассчитанные критерий Акаике (3) и байесовский информационный критерий (4).

Данные критерии позволяют выбрать наилучшую модель из группы моделей-претендентов. Преимущество отдается той модели, значения AIC

и BIC которой минимальны. Расчет произведен по следующим формулам:

$$AIC = \ln \hat{\delta}^2 + \frac{2}{n}r, \quad (3)$$

$$BIC = \ln \hat{\delta}^2 + \frac{\ln n}{n}r, \quad (4)$$

где $\hat{\delta}^2$ — остаточная сумма квадратов, деленная на количество наблюдений;

r — общее количество слагаемых ARIMA-модели.

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Модель ARIMA (2, 1, 2) имеет минимальные значения BIC и AIC критериев.

Таким образом, итоговая модель приняла следующий вид:

$$\Delta X = 32,3 - 1,329\Delta X_{t-1} - 0,585\Delta X_{t-2} - 1,602\varepsilon_{t-1} - 0,845\varepsilon_{t-2} + \varepsilon_t.$$

Качественные оценки полученных параметров модели приведены в табл. 4.

3. Получение прогнозных значений

При помощи полученной модели был спрогнозирован курс криптовалюты биткоин на 10 точек вперед. Результаты прогноза приведены на рис. 5.

Показатели, свидетельствующие о качестве полученной модели, приведены в табл. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Достоверность и адекватность полученных результатов были подтверждены сопоставлением фактических и прогностических параметров курса bitcoin, а также на основании высокого значения R-квадрат (рис. 6).

Построенные прогностические оценки, предсказывающие динамику и параметры курса биткоина на 3 лага вперед, также продемонстрировали по результатам ретроспективного анализа высокий уровень точности предсказанных значений курса анализируемой криптовалюты. По результатам расчетов было получено, что курс биткоина на прогнозируемую дату 20.03.2018 составит 9297,76 долл. США, фактическое значение в этот день — 8987; прогноз на 21.03.2018—8642,72, факт — 8948; прогноз на 22.03.2018—8998,22, факт — 8690 долл. США. Максимальная ошибка прогноза за указанный период не превышает 3,5%.

Итак, как видно из представленного графика, предсказанные значения с высокой точностью описывают предстоящие корректировки, что подтверждается крайне высоким уровнем предсказанной ежедневной смены трендов. Вместе с тем, несом-

Таблица 3 / Table 3

Выбор модели на основании AIC и BIC критериев / Selection of model based on AIC and BIC criteria

	AIC	BIC
ARIMA (2,1,1)	12,162015	12,19668655
ARIMA (2,1,2)	12,086669	12,13000837
ARIMA (1,1,2)	12,163773	12,19844515
ARIMA (1,1,1)	12,166205	12,19220874
ARIMA (2,1,0)	12,181602	12,20760531

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

Таблица 4 / Table 4

Оценки параметров модели / Model parameter estimates

	Оценка	Ст.ош.	T	Значимость
Константа	32,328	8,913	3,627	0,000
AR Лаг 1	-1,329	0,080	-16,595	0,000
Лаг 2	-0,585	0,079	-7,400	0,000
Дифференциальный				
СС Лаг1	-1,602	0,054	-29,523	0,000
Лаг 2	-0,845	0,054	-15,742	0,000

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

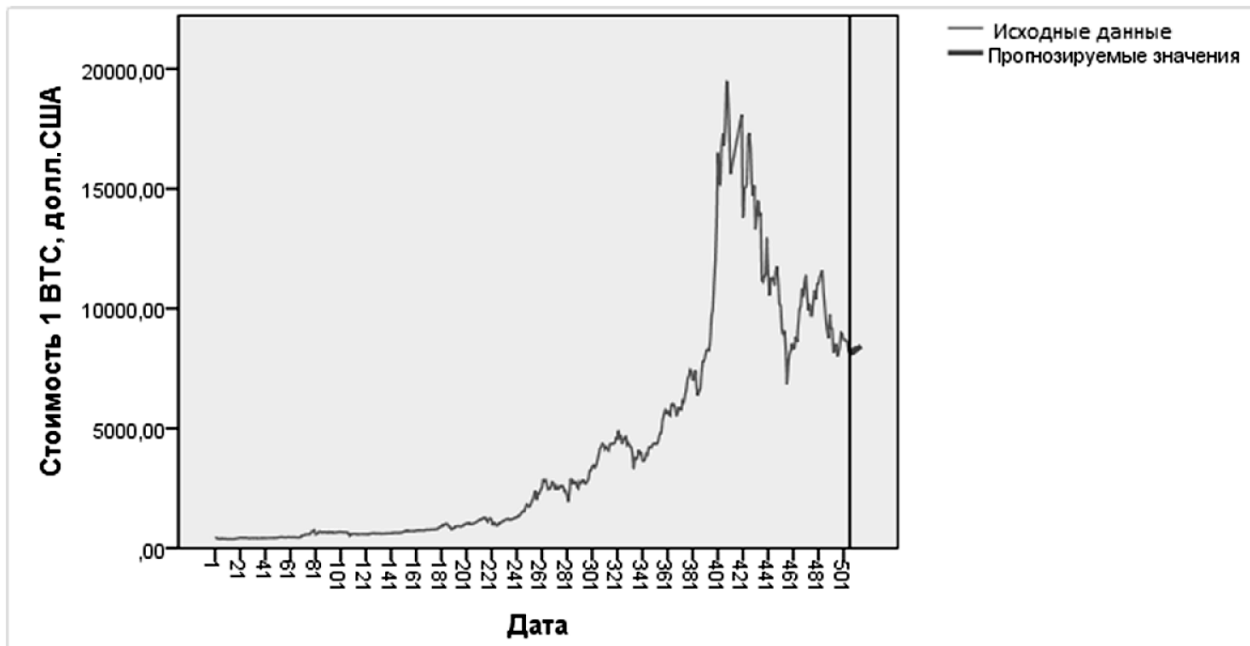


Рис. 5 / Fig. 5. Прогнозные значения курса биткоина, полученные с помощью ARIMA (2, 1, 2) / The predicted values of the bitcoin exchange rate, obtained with a help of ARIMA (2, 1, 2)

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

Качественные характеристики модели / Qualitative characteristics of the model

Критерий	Значение
Стационарный R-квадрат	0,871
R-квадрат	0,999
КСКО	165,93
СОМО	4,182
СМО	102,682
ММО	634,788

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

ненно, наблюдаются и незначительные расхождения между абсолютными значениями рядов, что вполне допустимо и укладывается в рамки прогностической погрешности.

Полученные результаты во многом свидетельствуют о перспективности выбранного инструментария прогнозирования, основанного на использовании алгоритмов авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего. Однако необходимо отметить, что построенная модель требует своего дальнейшего совершенствования. Так, к примеру, в связи с высокой изменчивостью исследуемого ряда представляется целесообразным применение моделей стохастической волатильности.

ВЫВОДЫ

Подводя итог реализованным оценкам и разработанному методическому инструментарию, необходимо отметить весьма высокий уровень его перспективности в рамках моделирования бизнес-процессов, основанных на использовании криптотранзакций. Это связано в первую очередь с острой необходимостью понимания и предсказания биржевых курсов криптовалюты, поскольку ее использование в хозяйственном обороте формирует весьма высокие риски финансовых потерь хозяйствующих субъектов, вызванных значительной волатильностью [17–19].

Несомненно, учитывая крайне низкий уровень развития рынка криптовалют в РФ (если не сказать зачаточный уровень) в части обеспечения товарооборота следует констатировать, что на текущий момент времени имеет место невысокий уровень востребованности со стороны бизнес-сообщества на подобного рода модели. Однако, учитывая динамично растущий спекулятивный спрос на рынке криптовалюты, а также полагаясь на возросшую в последнее время активность со стороны государ-

ственных регуляторов в сфере легализации рынка криптовалюты в РФ, интерес и важность к подобного рода методологическому инструментарию приобретает повышенную актуальность. Достаточно отметить, что только в 2017 г. реализована целая серия крупных научно-исследовательских проектов на эту тему, к которым, к примеру, можно отнести такие исследования, как «Сценарное моделирование развития рынка криптовалют в Российской Федерации и его влияние на перспективы развития расчетов за авиатранспортные услуги в деятельности ПАО «Аэрофлот»», реализованного для ПАО «Аэрофлот», «Законодательное регулирование внедрения и практического применения современных финансовых технологий. Анализ международного опыта и модальности адаптации в российской экономике» для Государственной Думы Федерального собрания РФ. В 2018 г. аппарат Государственной Думы РФ проводит тендер по исследованию способов нормативно-правового регулирования применения технологии блокчейн на финансовом рынке.

Несомненно, такого рода активизация по поставленной проблеме обусловлена во многом тем, что в конце 2017 г. Президент Российской Федерации утвердил поручение Правительству РФ в сфере регулирования рынка криптовалюты в национальной экономике⁴. В январе 2018 г. Министерством финансов РФ совместно с ЦБ разработан и опубликован проект Федерального закона «О цифровых финансовых активах»⁵.

⁴ Перечень поручений по итогам совещания по вопросу использования цифровых технологий в финансовой сфере. URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/55899> (дата обращения: 27.07.2018).

⁵ Проект Федерального закона «О цифровых финансовых активах». URL: https://www.minfin.ru/ru/document/?id_4=121810 (дата обращения: 27.07.2018).



Рис. 6 / Fig. 6. Сходимость прогностических и фактических данных, оценивающих биржевой курс bitcoin / Coherence of the forecasted and actual data of exchange rate bitcoin/\$US

Источник / Source: составлено авторами / authors' compilation.

Учитывая вышеизложенное предлагаемые в исследовании методологические подходы в значительной степени расширяют возможности предвидения перспектив развития рынка криптовалюты, что создает основу для выработки механизмов адаптации хозяйствующих субъек-

тов к его корректировкам, а также формируют устойчивые основы для процессов моделирования и прогнозирования финансовой устойчивости национальной экономики вследствие ее интеграции в глобальную систему «цифровых денег».

БЛАГОДАРНОСТЬ

Публикация подготовлена в рамках поддержанного РФФИ научного проекта № 18-010-00536.

ACKNOWLEDGEMENTS

The publication was prepared in the framework of the scientific project supported by RFBR No. 18-010-00536.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cocco L., Concas G., Marchesi M. Using an artificial financial market for studying a cryptocurrency market. *Journal of Economic Interaction and Coordination*. 2017;12(2):345–365. DOI: 10.1007/s11403-015-0168-2
2. Sauer B. Virtual currencies, the money market, and monetary policy. *International Advances in Economic Research*. 2016;22(2):117–130. DOI: 10.1007/s11294-016-9576-x
3. Ельшин Л. А., Абдукаева А. А. Возможности ускорения деловой активности экономических агентов на основе криптотранзакций. Методы, механизмы и факторы международной конкурентоспособности национальных экономических систем. Междунар. науч.-практ. конф. (Казань, 21 октября 2017 г.). Ч. 1. Уфа: Аэтерна; 2017:88–91. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EC-72-1.pdf> (дата обращения: 17.05.2018).
4. Bariviera A. F., Basgall M. J., Hasperué W., Naiouf M. Some stylized facts of the Bitcoin market. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017;484:82–90. DOI: 10.1016/j.physa.2017.04.159
5. Ельшин Л. А., Абдукаева А. А. Перспективы генерации деловой активности на основе использования цифровых денег. Методы, механизмы и факторы международной конкурентоспособности национальных экономических систем. Междунар. науч.-практ. конф. (Казань, 21 октября 2017 г.). Ч. 1. Уфа: Аэтерна; 2017:91–94. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EC-72-1.pdf> (дата обращения: 17.05.2018).

6. Ельшин Л.А., Абдукаева А.А. Финансовые инструменты активизации деловой активности: особенности и перспективы. Проблема риска в современных кризисных условиях мировой экономики. Междунар. науч.-практ. конф. (Волгоград, 1 ноября 2017 г.). Уфа: Аэтерна; 2017:74–77. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EK-73.pdf> (дата обращения: 27.07.2018).
7. Bouoiyour J., Selmi R. Bitcoin price: Is it really that new round of volatility can be on way? Munich Personal RePEc Archive. MPRA Paper. 2015;(65580). URL: https://mpa.ub.uni-muenchen.de/65580/1/MPRA_paper_65580.pdf (дата обращения: 27.07.2018).
8. Harwick C. Cryptocurrency and the problem of intermediation. *The Independent Review*. 2016;20(4):569–588. URL: http://www.independent.org/pdf/tir/tir_20_04_05_harwick.pdf (дата обращения: 27.07.2018).
9. Luther W.J. Cryptocurrencies, network effects and switching costs. *Contemporary Economic Policy*. 2016;34(3):553–571. DOI: 10.1111/coep.12151
10. White L.H. The market for cryptocurrencies. *Cato Journal*, 2015;35(2):383–402. URL: <https://object.cato.org/sites/cato.org/files/serials/files/cato-journal/2015/5/cj-v35n2-13.pdf> (дата обращения: 27.07.2018).
11. Woo D., Gordon I., Iaralov V. Bitcoin: A first assessment. Bank of America Merrill Lynch. 05 Dec. 2013. URL: https://www.aargauerzeitung.ch/asset_document/i/127472557/download (дата обращения: 27.07.2018).
12. Cheah E.T., Fry J. Speculative bubbles in Bitcoin markets? An empirical investigation into the fundamental value of Bitcoin. *Economics Letters*. 2015;130:32–36. DOI: 10.1016/j.econlet.2015.02.029.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Ч. 1. Пер. с англ. М.: Мир; 1974. 408 с.
14. Канторович Г.Г. Лекции: Анализ временных рядов. *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 2002;6(2):251–273.
15. Koblitz N., Menezes A.J. Cryptocash, cryptocurrencies and cryptocontracts. *Designs, Codes and Cryptography*. 2016;78(1):87–102. DOI: 10.1007/s10623-015-0148-5
16. Pieters G., Vivanco S. Financial regulations and price inconsistencies across Bitcoin markets. *Information Economics and Policy*. 2017;39:1–14. DOI: 10.1016/j.infoecopol.2017.02.002
17. Granger C.W.J., King M.L., White H. Comments on testing economic theories and the use of model selection criteria. *Journal of Econometrics*. 1995;67(1):173–187. DOI: 10.1016/0304-4076(94)01632-A
18. Perron P. Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variables. *Journal of Econometrics*. 1997;80(2):355–385. DOI: 10.1016/S 0304-4076(97)00049-3
19. Yelowitz A., Wilson M. Characteristics of Bitcoin users: An analysis of Google search data. *Applied Economics Letters*. 2015;22(13):1030–1036. DOI: 10.1080/13504851.2014.995359

REFERENCES

1. Cocco L., Concas G., Marchesi M. Using an artificial financial market for studying a cryptocurrency market. *Journal of Economic Interaction and Coordination*. 2017;12(2):345–365. DOI: 10.1007/s11403-015-0168-2
2. Sauer B. Virtual currencies, the money market, and monetary policy. *International Advances in Economic Research*. 2016;22(2):117–130. DOI: 10.1007/s11294-016-9576-x
3. Elshin L., Abdukaeva A. Possibilities for accelerating business activity of economic agents on the basis of cryptotransactions. In: Methods, mechanisms and factors of international competitiveness of national economies. Proc. Int. sci.-pract. conf. (Kazan, 21 Oct. 2017). Pt. 1. Ufa: Aeterna; 2017:88–91. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EC-72-1.pdf> (accessed 17.05.2018). (In Russ.).
4. Bariviera A.F., Basgall M.J., Hasperué W., Naiouf M. Some stylized facts of the Bitcoin market. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017;484:82–90. DOI: 10.1016/j.physa.2017.04.159
5. Elshin L., Abdukaeva A. Prospects for generating business activity using digital money. In: Methods, mechanisms and factors of international competitiveness of national economies. Proc. Int. sci.-pract. conf. (Kazan, 21 Oct. 2017). Pt. 1. Ufa: Aeterna; 2017:91–94. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EC-72-1.pdf> (accessed 17.05.2018). (In Russ.).
6. Elshin L., Abdukaeva A. Financial instruments for enhancing business activity: Features and prospects. In: The problem of risk in the current crisis conditions of the world economy. Proc. Int. sci.-pract. conf. (Volgograd, 01 Nov. 2017). Ufa: Aeterna; 2017:74–77. URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-EK-73.pdf> (accessed 27.07.2018). (In Russ.).
7. Bouoiyour J., Selmi R. Bitcoin price: Is it really that new round of volatility can be on way? Munich Personal RePEc Archive. MPRA Paper. 2015;(65580). URL: https://mpa.ub.uni-muenchen.de/65580/1/MPRA_paper_65580.pdf (accessed 27.07.2018).

8. Harwick C. Cryptocurrency and the problem of intermediation. *The Independent Review*. 2016;20(4):569–588. URL: http://www.independent.org/pdf/tir/tir_20_04_05_harwick.pdf (accessed 27.07.2018).
9. Luther W.J. Cryptocurrencies, network effects and switching costs. *Contemporary Economic Policy*. 2016;34(3):553–571. DOI: 10.1111/coep.12151
10. White L.H. The market for cryptocurrencies. *Cato Journal*, 2015;35(2):383–402. URL: <https://object.cato.org/sites/cato.org/files/serials/files/cato-journal/2015/5/cj-v35n2-13.pdf> (accessed 27.07.2018).
11. Woo D., Gordon I., Iaralov V. Bitcoin: A first assessment. Bank of America Merrill Lynch. 05 Dec. 2013. URL: https://www.aargauerzeitung.ch/asset_document/i/127472557/download (accessed 27.07.2018).
12. Cheah E.T., Fry J. Speculative bubbles in Bitcoin markets? An empirical investigation into the fundamental value of Bitcoin. *Economics Letters*. 2015;130:32–36. DOI: 10.1016/j.econlet.2015.02.029.
13. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time series analysis. Forecasting and control. Pt. 1. Transl. from Eng. Moscow: Mir; 1974. 408 p. (In Russ.).
14. Kantorovich G.G. Lectures: Time series analysis. *Ekonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki = The HSE Economic Journal*. 2002;6(2):251–273. (In Russ.).
15. Koblitz N., Menezes A.J. Cryptocash, cryptocurrencies and cryptocontracts. *Designs, Codes and Cryptography*. 2016;78(1):87–102. DOI: 10.1007/s10623-015-0148-5
16. Pieters G., Vivanco S. Financial regulations and price inconsistencies across Bitcoin markets. *Information Economics and Policy*. 2017;39:1–14. DOI: 10.1016/j.infoecopol.2017.02.002
17. Granger C.W.J., King M.L., White H. Comments on testing economic theories and the use of model selection criteria. *Journal of Econometrics*. 1995;67(1):173–187. DOI: 10.1016/0304-4076(94)01632-A
18. Perron P. Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variables. *Journal of Econometrics*. 1997;80(2):355–385. DOI: 10.1016/S 0304-4076(97)00049-3
19. Yelowitz A., Wilson M. Characteristics of Bitcoin users: An analysis of Google search data. *Applied Economics Letters*. 2015;22(13):1030–1036. DOI: 10.1080/13504851.2014.995359

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марат Рашитович Сафиуллин — доктор экономических наук, профессор, проректор по вопросам экономического и стратегического развития, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Marat.Safiullin@tatar.ru

Алиа Айдаровна Абдукаева — старший научный сотрудник, Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Aliya.Abdukaeva@tatar.ru

Леонид Алексеевич Ельшин — доктор экономических наук, заведующий отделом макроисследований и экономики роста, Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Leonid.Elshin@tatar.ru

ABOUT THE AUTHORS

Marat R. Safiullin — Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice-rector for economic and strategic development, Kazan (Privolzhsky) Federal University, Kazan, Russia

Marat.Safiullin@tatar.ru

Aliya A. Abdukaeva — senior researcher, Center for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

Aliya.Abdukaeva@tatar.ru

Leonid A. El'shin — Dr. Sci. (Econ.), head of the Department of macro-studies and growth economics of the Center for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

Leonid.Elshin@tatar.ru