

© 2019

**Марат Сафиуллин**

доктор экономических наук, профессор, проректор Казанского (Приволжского) федерального университета  
(e-mail: c.p@tatar.ru)

**Алия Абдукаева**

ведущий научный сотрудник Центра перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан  
(e-mail: Aliya.Abdukaeva@tatar.ru)

**Леонид Ельшин**

доктор экономических наук, директор Центра стратегических оценок и прогнозов Казанского (Приволжского) федерального университета  
(e-mail: Leonid.Elshin@tatar.ru)

## **ARCH/GARCH-МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ВОЛАТИЛЬНОСТИ РЫНКА КРИПТОВАЛЮТЫ (НА ПРИМЕРЕ БИТКОИНА)**

Цифровизация хозяйственных процессов существенным образом трансформирует устоявшиеся модели развития экономических систем, формируя новые факторы социально-экономического роста.

В данной статье предложен инструментарий прогнозирования рынка криптовалюты на основе построения модели авторегрессионной условной гетероскедастичности. Работа позволяет определить наиболее подходящую модель из семейства GARCH для прогнозирования одной из наиболее распространенных и востребованных криптовалют в мире – биткоина. Предлагаемый и апробированный инструментарий дает возможность планирования развития рынка криптовалюты на краткосрочный период. Это, в свою очередь, может служить основой для контроля и предсказания будущих корректировок рынка, что позволяет координировать меры государственного планирования в данном секторе экономических отношений.

**Ключевые слова:** цифровая экономика, рынок криптовалюты, прогнозирование, модели GARCH, биткоин, планирование.

DOI: 10.31857/S020736760007591-9

Высокие темпы развития глобального рынка криптовалюты, его проникновение в национальные экономические системы обуславливает необходимость глубокого изучения его перспектив. Особенно актуально это в условиях активизации экспертного сообщества при обсуждении целесообразности легализации рынка цифровых денег. Вместе с тем, следует заметить, что несмотря на весьма динамично возрастающий интерес к данному инструменту финансовых технологий, на текущий момент существуют полярные взгляды на перспективы интеграции рынка криптовалюты в национальные системы экономических отношений. С одной стороны, многие эксперты, представители государственных это

очередной «мыльный» пузырь, финансовая пирамида, влекущая за органов управления придерживаются точки зрения, что криптовалюта – собой известные риски для экономики и ее хозяйствующих субъектов [1]. С другой – все чаще можно встретить подходы, в соответствии с которыми обосновывается необходимость разработки мер, обеспечивающих адаптацию финансовой системы государства к проникновению крипторынка в систему операционных процессов экономики. При этом главным аргументом данной позиции является то, что современная экономика, являясь открытой системой, в той или иной форме будет подвержена проникновению в нее так называемых цифровых денег. Вопрос лишь заключается в том, в какой форме и в каком нормативно-правовом статусе будут происходить эти процессы. Криптовалюта, в основе которой заложена технологическая платформа блокчейн, формирует, помимо эффекта реализации прогрессивных методов финансово-операционных операций, основы для развития и внедрения в социэкономическую среду новых форм экономических отношений, построенных на инновационных принципах. В их основу заложен комплекс технологических решений, формирующих основу для слияния финансовых услуг с реальным сектором экономики минимизируя участие различного рода посредников (финансовых компаний, консалтинговых организаций и др.), доля которых в среднесрочной перспективе значительным образом трансформируется. К примеру, согласно проведенным исследованиям РАНХиГС «к 2030 году в результате происходящих процессов цифровизации экономики РФ рынок труда претерпит серьезные изменения, компетенции 20,1 млн. человек окажутся не востребованными на рынке труда, формируя так называемую «квалификационную яму» [2].

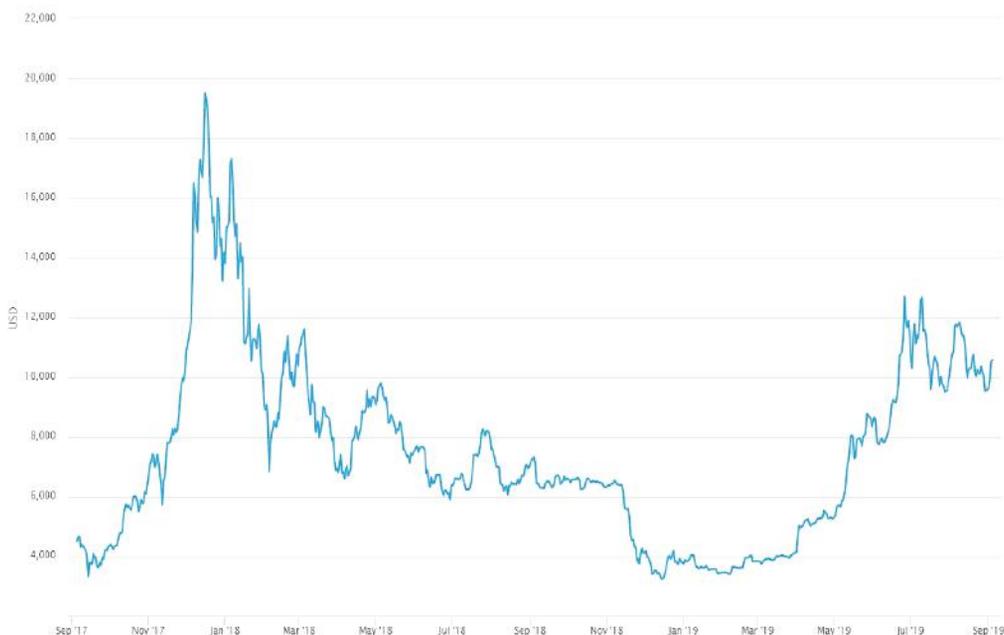
На текущий момент времени весьма распространенной точкой зрения является позиция, в соответствии с которой криптовалюты – очередной шаг в развитии технологий системы ФинТеха, а следовательно, и новых форм бизнес-моделей, обеспечивающих рост уровня удовлетворения потребностей хозяйствующих субъектов в условиях цифровизации экономики. Полагаясь на мнение ряда экспертов, высказывающихся по поставленному здесь вопросу [3–5], компании, которые раньше адаптируются к новым формам финансовых отношений, основанных на рассматриваемых технологиях, получают дополнительные выгоды, как это сделали компании, оценившие на начальном этапе развития процессы коммерциализации бизнес-процессов в интернет.

Дополнительным аргументом, обосновывающим текущую актуальность вопроса о перспективности изучения развития рынка цифровых денег, может выступать и наличие тенденций развития в последние годы «теневого банкинга», включающего в себя организации, осуществляющие деятельность в финансовом секторе экономики не имеющие официальный, формальный статус банковского учреждения, но, при этом, оказывающие аналогичные услуги кредитования и страхования. При этом важно понимать, что под категорией «теневого банкинга» не имеется ввиду незаконность реализации финансовых услуг подобного рода компаниями. Такие организации лишены доступа к кредитным

продуктам Центрального банка и формируют свои продукты в рамках внебанковских каналов (электронные площадки краудфандинга, кредитования, ISO и другие). Таким образом можно говорить, что криптовалюта как один из источников спекулятивных и инвестиционных источников является типичным представителем «теневого банкинга».

Полагаясь на представленный выше далеко не полный перечень аргументов, можно с определенной долей уверенности утверждать, о том, что рынок криптовалюты продолжит демонстрировать процесс вертикальной и горизонтальной интеграции в национальные экономические системы. Достаточно заметить, что не случайно в последние три года в российской системе государственного управления достаточно отчетливо начали формироваться тренды, ориентированные на поиск путей, обеспечивающих адаптационные меры финансовой системы российской экономики к новым технологиям ФинТеха, включая и рынок криптовалюты [6].

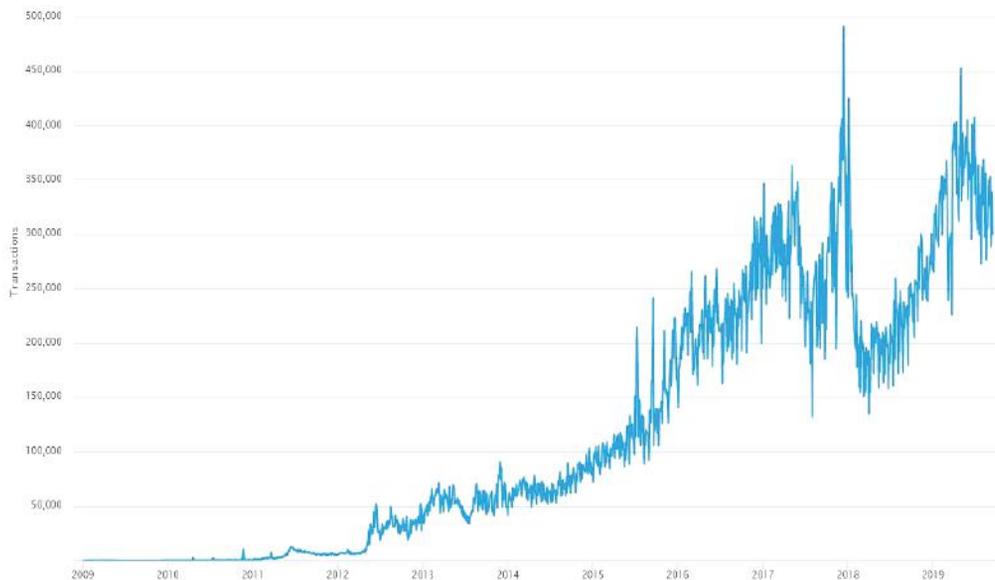
Подобного рода активизация во многом обусловлена динамично набирающим в последние годы оборотом рынка криптовалюты. Несмотря на его достаточно высокую волатильность как в кратко-, так и в среднесрочном горизонте времени, проявляющиеся признаки циклического развития, динамика ключевых показателей рассматриваемого рынка демонстрирует очень высокий уровень активности. Достаточно отметить, что если на начало 2015 года его объем оценивался в 3,6 млрд долларов, то к концу 2019 года – в 260,6 млрд долларов (Рис. 1).



**Рис. 1. Курс криптовалюты «биткоин»**

Источник: <https://www.blockchain.com/stats>

Важно указать и на то, что по уровню количества фиксируемых транзакций на рынке криптовалюты также наблюдается экспоненциальный тренд (Рис. 2).



**Рис. 2.** Количество подтвержденных транзакций на рынке криптовалюты

Источник: <https://www.blockchain.com/stats>

Учитывая, что российский рынок цифровых денег составляет порядка 5% от мирового рынка криптовалюты [7], а также принимая во внимание его заметную активизацию в последние годы, весьма актуальной научно-исследовательской задачей становится поиск и разработка прогностических моделей, оценивающих перспективы развития исследуемого рынка цифровых денег.

Решение поставленного вопроса носит весьма нетривиальный характер. Обусловлено это, в первую очередь, тем, что использование набора классических инструментов технического анализа, применяемого для оценки перспектив развития фондовых рынков, не может объективно использоваться в процессе предсказания будущих траекторий курса криптовалют. Это связано с тем, что факторы, определяющие волатильность рынка цифровых денег, носят исключительно спекулятивный характер, не могут полагаться на исследование базовых активов, формирующих во многом корректировки на традиционных финансовых рынках. В связи с чем представляется целесообразным исследование дополнительных методических подходов, формирующих и предопределяющих идентификацию направлений поиска моделей динамики развития крипторынка, учитывающих его уникальный характер с точки зрения фундаментальной составляющей — децентрализованный характер регулирования, основанный преимущественно на спекулятивной составляющей.

Высокая волатильность (Рис. 1) крипторынка также усиливает аргументацию, заключающуюся в том, что для моделирования подобных рядов применение традиционных моделей недостаточно.

В этой связи учеными в последние годы достаточно активно предпринимаются попытки разработки адаптируемых к специфическим особенностям исследуемого рынка прогностических моделей [8, 9]. Авторы настоящего исследования также прорабатывали подобного рода вопросы. К примеру, были исследованы перспективы использования моделей машинного обучения (нейропрограммирование), методов учета ARMA/ARIMA моделей в процессе построения прогностических моделей корректировки биржевых курсов биткоина и др. [10,11]. Каждая из них продемонстрировала свою состоятельность. Однако, не останавливаясь на достигнутом результате, а также в целях совершенствования методических подходов к реализации построения консенсус-прогнозов, в данной статье авторы предлагают новые инструменты прогнозирования динамики развития крипторынка (на примере биткоина).

По нашему мнению, одной из перспективных, с методологической точки зрения, моделей, позволяющих дополнительно оценить степень влияния прошлых котировок финансовых рядов на их текущее значение с учетом ценовой неопределенности, является Autoregressive Conditional Heteroscedasticity model (ARCH), или модель авторегрессионной условной гетероскедастичности.

Для настоящего исследования использовались данные о ежедневных котировках криптовалюты биткоин в период с 05.09.2017 по 05.09.2019 гг., что соответствует 730 наблюдениям<sup>1</sup>. Расчеты выполнены с помощью статистического пакета Eviews.

ARCH-модель предложена Энглom в 1982 году [12]. Предназначена для «объяснения» кластеризации волатильности, когда периоды высокой волатильности сменяются периодами низкой волатильности.

Модель предполагает, что безусловная дисперсия случайной ошибки постоянна, в то время условная дисперсия, наоборот, не постоянна. В общем виде спецификация модели ARCH (1) выглядит:

$$Y_t = X_t' \theta + \varepsilon_t,$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \alpha \varepsilon_{t-1}^2,$$

при  $\omega \geq 0$ ,  $\alpha \geq 0$ ,

где  $Y_t$  – текущее значение;

$X_t' \theta$  – функция внутренних переменных;

$\varepsilon_t$  – случайная величина;

$\sigma_t^2$  – условная дисперсия на момент времени  $t$ ;

$\omega$  – базовый уровень волатильности;

$\alpha$  – коэффициент, определяющий степень влияния прошлой информации на текущее значение волатильности [12].

<sup>1</sup> <https://www.blockchain.com/ru/charts/market-price?timespan=all>.

Перед подбором ARCH модели необходимо убедиться, что остатки ARMA-модели условно гетероскедастичны. Для этого необходимо построить коррелограмму и проанализировать авторегрессию. (Табл.1, Рис. 3.).

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 0.060	0.060	1.9810	0.159
		2 -0.041	-0.045	2.9191	0.232
		3 0.071	0.077	5.7336	0.125
		4 -0.057	-0.069	7.5710	0.109
		5 0.051	0.068	9.0588	0.107
		6 -0.026	-0.047	9.4326	0.151
		7 0.069	0.092	12.084	0.098
		8 0.123	0.096	20.660	0.008
		9 -0.067	-0.064	23.234	0.006
		10 0.101	0.107	29.029	0.001
		11 -0.053	-0.086	30.623	0.001
		12 -0.042	-0.002	31.637	0.002
		13 -0.004	-0.044	31.644	0.003
		14 -0.054	-0.021	33.322	0.003
		15 0.099	0.073	38.980	0.001
		16 -0.048	-0.064	40.281	0.001
		17 -0.009	0.021	40.332	0.001
		18 0.120	0.078	48.615	0.000
		19 -0.022	0.016	48.888	0.000
		20 -0.001	-0.017	48.890	0.000
		21 0.040	0.058	49.813	0.000
		22 -0.029	-0.035	50.297	0.001
		23 -0.055	-0.077	52.048	0.000
		24 0.021	0.062	52.306	0.001
		25 0.105	0.058	58.750	0.000
		26 -0.024	-0.038	59.091	0.000
		27 -0.076	-0.064	62.494	0.000
		28 -0.040	-0.063	63.425	0.000
		29 -0.061	-0.045	65.573	0.000
		30 -0.068	-0.057	68.313	0.000
		31 0.058	0.091	70.264	0.000
		32 -0.011	-0.039	70.336	0.000
		33 -0.020	-0.020	70.572	0.000
		34 -0.017	-0.010	70.749	0.000
		35 0.037	0.067	71.582	0.000
		36 -0.024	-0.041	71.937	0.000

*Примечание:*

Autocorrelation (AC) – Автокорреляция

Partial Correlation (PAC) – Частная автокорреляция

**Рис. 3. Коррелограмма для ряда «Курс биткоина»**

Таблица 1

## Параметры авторегрессии 1-го и 2-го порядка

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t- статистика	p-значение
C	8.822608	0.243001	36.30682	0
AR (1)	1.086312	0.030058	36.14050	0
AR (2)	-0.093562	0.030921	-3.025815	0.0026

По полученным остаткам построена диаграмма (Рис. 4). Значение теста Харке-Бера отвергает нулевую гипотезу, куртозис имеет значение больше 3, что позволяет сделать вывод о том, что распределение остатков не соответствует нормальному.

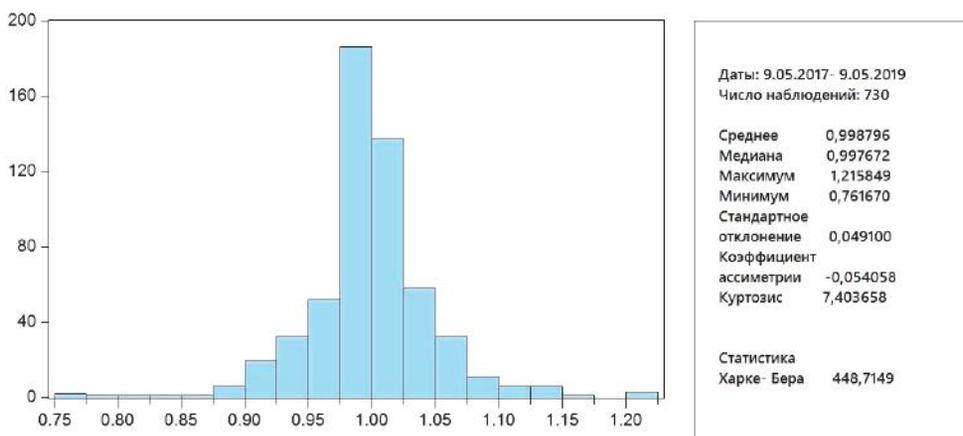


Рис. 4. Гистограмма остатков

На следующем этапе исследования проведен тест остатков на гетероскедастичность (Табл.2).

Таблица 2

## Тестирование остатков на гетероскедастичность

F- статистика	5313.777
Obs*R-squared	501.8657
Prob.F (1,552)	0
Prob. Chi-Square	0

По параметру Prob. Chi-Square(1) осуществляется проверка гипотезы об отсутствии в остатках ARCH-эффекта. Таким образом, гипотеза отвергается, что свидетельствует о наличии ARCH-эффекта.

После реализации теста на гетероскедастичность можно приступить к главной задаче — к спецификации модели. Описательная статистика представлена в табл.3.

Таблица 3

## Описательная статистика для ряда «Биткоин»

Средняя	7542,88
Медиана	6989,07
Максимум	19498,68
Минимум	3271,238
Среднеквадратическое отклонение	3335,37
Коэффициент асимметрии	1,038132
Куртозис	4,001505
Статистика Харке-Бера	122,8835
Сумма	4186303,04
Число наблюдений	730

Для выбора наилучшей модели в настоящем исследовании протестированы следующие: ARCH, GARCH, EGARCH, PARCH, TARЧH, компоненты GARCH (CGARCH).

Модель выбирается на основании значений трех информационных критериев, а именно: информационного критерия Акаике (АИК), байесовского информационного критерия (БИК) и критерия Ханнан-Quinn (HQ), каждый из которых оценивает качество подгонки модели исходя из числа оцениваемых параметров. Оптимальной является модель с минимальным значением критериев.

GARCH процесс (Обобщенный ARCH), предложенный Т. Боллерселевым, в отличие от ARCH-моделей, характеризуется не только бесконечной памятью, но и позволяет использовать меньшее число параметров [8]. Модель GARCH (p,q) описывается формулой:

$$\sigma_t^2 = a_0 + \sum_{j=1}^q a_j \varepsilon_{t-j}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j \sigma_{t-j}^2$$

где  $p$  – число лагов условной дисперсии, порядок модели – количество последних ценовых изменений, влияющих на текущую волатильность;

$q$  – порядок модели – количество предшествующих оценок волатильности, влияющих на текущую волатильность;

$a_0$  – константа – базовая волатильность,

$a_j$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния предыдущих изменений цен на текущее значение волатильности,

$b_j$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния предыдущих оценок волатильности на текущее значение.

Результаты оценки моделей GARCH- типа приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Результаты оценки моделей GARCH-типа

Модель	Уравнение
ARCH (1)	$ARCH(1) = 141107,4 + 1,003\varepsilon_{t-1}^2$
ARCH (2)	$ARCH(2) = 156147,6 + 1,07\varepsilon_{t-1}^2 - 0,069\varepsilon_{t-2}^2$
ARCH (3)	$ARCH(3) = 156147,6 + 1,07\varepsilon_{t-1}^2 - 0,08\varepsilon_{t-2}^2 + 0,012\varepsilon_{t-3}^2$

GARCH (1,1)	$GARCH(1,1) = 166358,3 + 1,075\varepsilon_{t-1}^2 - 0,07\sigma_{t-1}^2$
GARCH (1,2)	$GARCH(1,2) = 162512,1 + 1,078063\varepsilon_{t-1}^2 - 0,09\sigma_{t-1}^2 + 0,02\sigma_{t-2}^2$
PARCH (1,1)	$PARCH(1,1) = 0,03 + 1,21 \varepsilon_{t-1}^2  + 0,44\varepsilon_{t-1}^{0,21} - 0,082\sigma_{t-1}^{0,21}$
PARCH (1,2)	$PARCH(1,2) = 0,23 + 1,3 \varepsilon_{t-1}^2  - 0,35\varepsilon_{t-1}^{0,43} - 0,089\sigma_{t-1}^{0,43} + 0,008\sigma_{t-1}^{0,43}$
EGARCH (1,1)	$EGARCH(1,1) = -2,0319 - 2,032\left \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}}\right  - 0,498\left \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}}\right  + 0,992\log\sigma_{t-1}^2$
EGARCH (1,2)	$EGARCH(1,2) = -2,013 + 2,642\left \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}}\right  - 0,47\left \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}}\right  - 0,02\left \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}}\right  + 0,9927\log\sigma_{t-1}^2$
TARCH (1,1)	$TARCH(1,1) = 166360,6 + 1,075\varepsilon_{t-1}^2 + 0,05(\sigma_{t-1}^2 * (\sigma^2 < 0)) - 0,07\sigma_{t-1}$
CGARCH (1,1)	$CGARCH(1,1) = 271104 + 0,99(\sigma_{t-1} - 271104) + 1,065\varepsilon_{t-1}^2 - GARCH(-1)$ $GARCH = CGARCH(1,1) + 0,0002(\varepsilon_{t-1}^2 - CGARCH(-1)) + 1,017(GARCH(-1) - CGARCH(-1))$

Результаты оценки моделей представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты оценки моделей GARCH типа

	Информационный критерий Акаике (AIC)	Байесовский информационный критерий (BIC)	Информационный критерий Ханнана-Куина (Hannan-Quinn criterion)
ARCH (1)	20,523	20,538	20,529
ARCH (2)	20,526	20,549	20,535
ARCH (3)	20,53	20,56	20,54
GARCH (1,1)	<b>20,526</b>	<b>20,521</b>	<b>20,535</b>
GARCH (1,2)	20,531	20,561	20,542
PARCH (1,1)	20,533	20,57	20,549
PARCH (1,2)	20,537	20,584	20,55
EGARCH (1,1)	20,53	20,56	20,542
EGARCH (1,2)	20,533	20,572	20,549
TARCH (1,1)	20,53	20,561	20,542
CGARCH (1,1)	20,533	20,572	20,549

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что описанные модели достаточно точно могут описывать динамику криптовалюты биткоин, однако, наибольшую точность обеспечивает модель GARCH (1,1).

Характеристики модели GARCH (1,1) представлены в табл.6.

Прогнозные значения, построенные на основе полученной оптимальной модели GARCH (1,1), представлены на рисунках 5, 6.

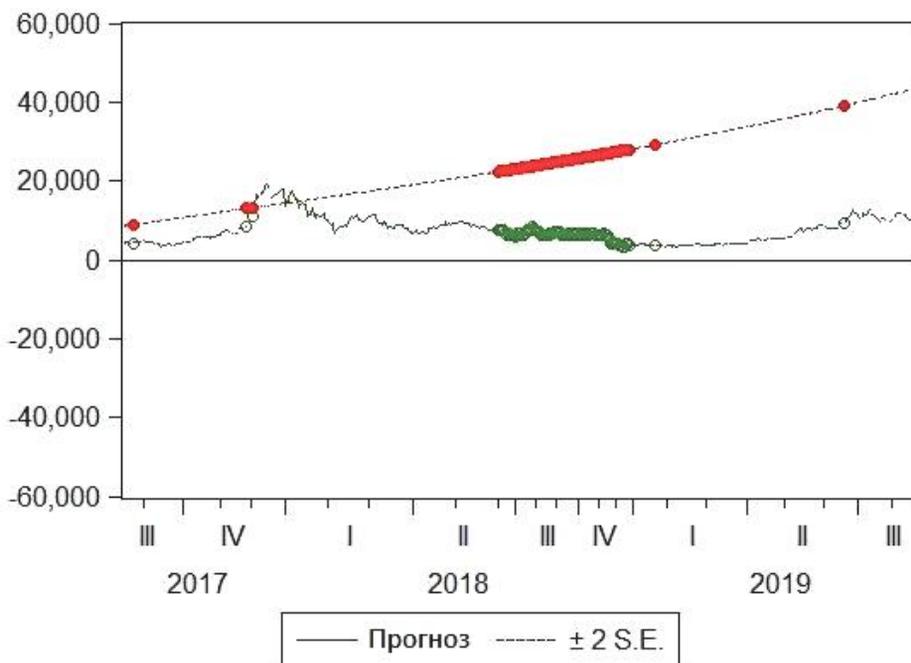


Рис. 5. Смоделированные значения для ряда «Курс криптовалюты биткоин»

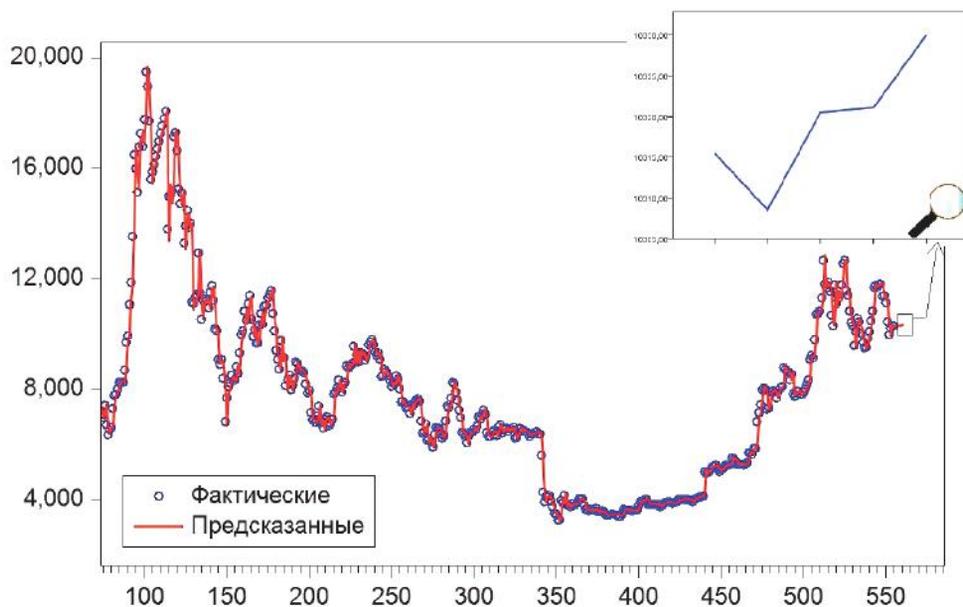


Рис. 6. Сопоставление исходных и прогнозных данных

## Характеристики модели GARCH (1,1)

$$GARCH = C(1) + C(2) * \varepsilon_{t-1}^2 + C(3) * \sigma_{t-1}$$

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	z- Статистика
C	166358.3	38171548	0.004358
$\varepsilon_{t-1}^2$	1.075257	5.670685	0.189617
$\sigma_{t-1}$	-0.071435	5.516576	-0.012949

Полученные результаты во многом свидетельствуют о перспективности применения моделей типа GARCH в процессе построения прогнозных моделей динамики рынка криптовалюты (смоделированные значения в существенной степени высоко аппроксимируют исходный ряд, соответствующий коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,98). Полагаясь на них, а также опираясь на построенные в наших ранних исследованиях [11] прогностические модели (LTSM, ARMA/ARIMA), отмечаем весьма продуктивную возможность построения консенсус-прогнозов, что обеспечивает «трехконтурный» анализ перспектив развития крипторынка на краткосрочную перспективу. Это, в свою очередь, может служить основой для контроля за будущими корректировками рынка, что обеспечивает процесс координации мер государственного контроля в данном динамично расширяющемся секторе экономических отношений. Несомненно, разработанный инструментарий может служить основой и для инвесторов, осуществляющих свою деятельность на рынках «теневое банкинга», приобретающего в последние годы популярность среди хозяйствующих субъектов.

В целом необходимо отметить, что несмотря на противоречивое отношение экспертного сообщества к рынку криптовалюты, его интеграция в систему экономических отношений с каждым годом усиливается. Проникновение рынка цифровых денег в экономику государства требует соответствующего контроля со стороны органов исполнительной власти. При этом данная форма контроля может осуществляться на основе различных подходов: начиная от абсолютного запрета на использование крипто-transакций в экономике и заканчивая методами координации субъектов крипторынка посредством предсказания перспектив его развития. В ходе активного обсуждения в России перспектив легализации крипторынка наблюдается крен в пользу необходимости содержательного анализа и нормативного регулирования его развития. Вместе с тем, отсутствие практического инструментария, формирующего основу для координации процессов для контроля за развитием исследуемого рынка, ведет к формированию зоны риска — финансовой устойчивости экономических агентов, осуществляющих свою деятельность на рынках цифровых денег, включая, несомненно, и государство. Реализация методических подходов, определяющих основы краткосрочного прогнози-

рования рынка криптовалюты, во многом может способствовать нивелированию неизбежных противоречий, координации и контролю за развитием рынка криптовалюты и его проникновением в систему хозяйственных операций.

### Литература

1. *Николайчук О.А.* Электронная валюта в свете современных правовых и экономических вызовов // Журнал экономического регулирования, 2017, том. 8 (№ 1), п. 142–154.
2. Выступление Руководителя Центра Россия-ОЭСР РАНХиГС А. Левашенко на конференции РБК Режим доступа: <https://www.ranepa.ru/images/News/2018-12/25-12-2018-oesr.pdf>.
3. *Эскиндаров М.А., Абрамова М.А. и др.* Направления развития финтех в России: экспертное мнение финансового университета // Мир новой экономики. 2018. № 2. С. 6–23.
4. *Григорьев А.В., Лебедева И.В.* Биткоин и экономическая политика России // Каспийский регион: политика, экономика, культура. 2018. № 1 (54). С. 111–115.
5. *Поветкина Н.А., Леднева Ю.В.* «Финтех» и «Регтех»: границы правового регулирования // Право. Журнал Высшей школы экономики. 2018. № 2. С. 46–67.
6. *Худько Е.В.* Рынок Финтех в России: последствия для деятельности традиционных финансовых институтов // Финансовый менеджмент. 2019. № 1. С. 95–105.
7. *Борисова О.В.* Криптовалюта как средство повышения привлекательности российского бизнеса // Стратегии бизнеса. 2017. № 9 (41). С. 17–21.
8. *Granger, C.W.J., King, M.L., White, H.* : "Comments on the Testing of Economic Theories and the Use of Model Selection Criteria" // Journal of Econometrics, 1995, 67. P. 173–187.
9. Woo, David et al, 2013. Bitcoin: A First Assessment FX and Rates.
10. *Сафиуллин М.Р., Абдукаева А.А., Ельшин Л.А.* Разработка прогностической модели динамики курса криптовалют с применением инструментов стохастического анализа // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2018. № 5. С. 161–173.
11. *Сафиуллин М.Р., Ельшин Л.А., Абдукаева А.А.* Разработка многофакторной прогностической модели развития глобального рынка криптовалюты // Теоретическая и прикладная экономика. 2018. № 3. С. 151–161.
12. *Engle R.F.* Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of variance of United Kingdom inflation // Econometrica. 1982. V. 50. P. 987–1008.