

тегирования и программирования в России // Региональные исследования. 2016. № 4. С. 17-30.

3. Основные направления единой государственной денежно-кредитной политики на 2018 год и период 2019 и 2020 годов. М. : ЦБ РФ, 2017. 148 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cbr.ru/publ/ondkp/on_2018\(2019-2020\).pdf](http://www.cbr.ru/publ/ondkp/on_2018(2019-2020).pdf) (дата обращения 25.07.18).

4. *Какатунова Т. В., Палюх Б. В.* Нечеткая когнитивная карта как инструмент моделирования инновационной деятельности на региональном уровне // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 128-132.

5. *Alibalaeva L. I.* Fuzzy-multiple methods in creation of the model of the regional agro-industrial complex development in case study of the Republic of Dagestan // Soft Computing and Measurements (SCM) 2018 XXI International Conference. IEEEConferencePublications. 2018.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕНЫ КРИПТОВАЛЮТЫ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО P -АДИЧЕСКОГО МЕТОДА

С. А. Ахуньянова

*Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Россия
E-mail: sofi_perm@mail.ru*

Обозначена актуальная проблема прогнозирования динамики курсов цифровых валют (криптовалют). Перечислены методы и подходы, позволяющие решить поставленную проблему. В работе для прогнозирования динамики Bitcoin применен междисциплинарный метод p -адического анализа, который ранее использовался только для анализа динамики финансовых активов. Поэтому на случай сильно волатильных данных, которыми являются цены криптовалюты, p -адический метод усовершенствован и дополнен. В частности, p -адический метод прогнозирования может быть специализирован, во-первых, с помощью процедуры скользящего экзамена, во-вторых, с помощью учета весов в параметрах p -адического уравнения и/или с помощью определения значимого лага при выборе p -адической модели. Сравнение p -адических прогнозов, полученных на основе специализированного p -адического метода, осуществлен с использованием критериев качества MAE и MAPE. В результате сравнения p -адических прогнозов динамики цены Bitcoin выбран оптимальный, который определяется значимым лагом в p -адической модели.

FORECASTING THE DYNAMICS OF PRICE OF THE CRYPTOCURRENCY ON THE BASIS OF THE SPECIALIZED P -ADIC METHOD

S. A. Akhunyanova

The current problem of forecasting the dynamics of the exchange rates of digital currencies (cryptocurrencies) is designated. The methods that may to solve this problem are listed. In the article for predict the dynamics of the price of Bitcoin is used the cross-disciplinary p -adic method, that was used earlier only to analyze the dynamics of the price of financial assets. Therefore, for highly volatile data, including the prices of the cryptocurrency, the p -adic method is improved and supplemented. In particular, the p -adic method of forecasting can be specialized, firstly, using the jackknife method, secondly, using a weight coefficients in the parameters of the p -adic equation

and/or using a significant lag for the definition the p -adic models. The comparison of the p -adic forecasts found on the basis of the specialized p -adic method is received with the help on quality criteria MAE and MAPE. As a result of comparison of the p -adic forecasts of the dynamics of the Bitcoin's price, there is chosen optimal forecast, that is determined by the significant lag in the p -adic model.

В настоящее время на финансовом рынке продолжается развитие рынка производных финансовых инструментов, совершенствуется механизм финансового регулирования, вводятся финансовые инновации. К одной из последних финансовых инноваций можно отнести цифровую (электронную) валюту, разновидностью которой является криптовалюта. Она имеет собственные характеристики, которые отличают ее как от традиционной валюты, так и от финансового актива, и в то же время делают ее похожей на них. Ввиду специфических свойств криптовалюты для всех участников рынка, а также аналитиков возникает актуальная проблема прогнозирования ее котировок. В данном случае решение поставленной проблемы может заключаться в изменении имеющихся моделей прогнозирования или разработке новых методов прогнозирования финансовых временных рядов.

Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена, с одной стороны, тем, что объект (рынок криптовалют) и предмет (динамика котировок криптовалют) исследования связаны с финансовой инновацией – криптовалютой, обладающей рядом особенностей, а с другой – методом исследования, который в данной работе представлен p -адическим подходом. Это новый, междисциплинарный, работающий на стыке математики и физики аппарат.

Исследование состоит из следующих этапов. Во-первых, изучаются общие и специфические свойства криптовалюты. Во-вторых, дается обзор существующих методов и моделей моделирования и прогнозирования динамики котировок криптовалюты. В-третьих, на основе специализированного p -адического метода строятся прогнозы динамики курса криптовалюты и путем сравнения их оценок точности делается вывод о наиболее оптимальном типе прогноза.

Характеристики криптовалюты Bitcoin

Сегодня одной из наиболее популярных криптовалют является Bitcoin, хотя его протокол был разработан и описан в статье Сатоши Накамото совсем недавно, в 2008 г. [1]. Затем в 2009 г. разработчиками протокола сгенерирован первый блок протокола Bitcoin и совершена первая транзакция криптовалюты с использованием одноранговой Peer-To-Peer технологии [2]. Таким образом, это не только цифровая (электронная), но и децентрализованная валюта, т.е. такая валюта, которая не является фиатной и не контролируется каким-либо одним субъектом, например, Центральным банком [3].

Для криптовалюты и, в частности, Bitcoin характерно наличие асимметрии, куртозиса и условной гетероскедастичности [4] так же, как и для многих традиционных валют и финансовых активов. Но в отличие от них, курс криптовалют сильно волатилен, что объясняется незрелостью рынка криптовалют, отсутствием его регулирования и отсутствием фундаментальной ценности са-

мой криптовалюты. Сильную волатильность можно обнаружить путем сравнения значений стандартных отклонений¹ курса Bitcoin ($\sigma = 41,76\%$), курса рубля к доллару ($\sigma = 3,94\%$) и индекса РТС ($\sigma = 5,82\%$) за прошедший год (01.08.2017 – 01.08.2018).

Обзор методов моделирования динамики курса криптовалюты

Анализ финансовых временных рядов условно делится на два направления: во-первых, на моделирование и прогнозирование динамики финансовых инструментов, во-вторых, на обнаружение финансовых пузырей, аномалий в поведении финансовых инструментов. То же самое относится и к исследованиям котировок криптовалюты. В соответствии с темой статьи приводится обзор литературы только по первому направлению. Для прогнозирования курсов криптовалют современные исследователи используют модели временных рядов: модели *VAR* в [5] и [6], *VECM* в [5] и [7], *ADL* в [8], модели семейства *GARCH* в [9] и [4]; а также междисциплинарные методы, например, подход непрерывных вейвлетов в [10], нейросетевой анализ в [11] и др.

Таким образом, существует огромное количество методов, с помощью которых можно прогнозировать значения курса криптовалюты. В рамках настоящей работы для прогнозирования динамики курса Bitcoin выбран формализованный и междисциплинарный метод – p -адический анализ. Он впервые будет применен к получению прогнозов криптовалюты.

P -адический метод прогнозирования

Для краткосрочного (на $\tau = 10$ часов вперед, далее τ – глубина прогнозирования) прогнозирования динамики курса Bitcoin взяты его почасовые данные, представленные в виде лог-разности ($\ln(BTC|USD_t/BTC|USD_{t-1})$), с 00:00 05.12.2017 по 18:00 12.12.2017, т.е. всего $n = 186$ наблюдений. На основе имеющихся данных построена p -адическая кусочно-линейная модель по методике, изложенной в работе [12]. Принято, что в качестве критерия точности p -адических моделей и прогнозов использованы:

- а) средняя абсолютная ошибка (MAE, Mean Absolute Error) для показателя лог-разности курса криптовалюты,
- б) средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE, Mean Absolute Percent Error) для цены закрытия криптовалюты.

Из-за высокой волатильности цены криптовалюты (по сравнению с волатильностью традиционных валют и индексов финансовых активов) p -адический метод моделирования специализирован: в целевую функцию включается сумма расстояний между исходными и модельными значениями не только лог-разности, но и цены закрытия ($BTC|USD_t$) на интервале моделирования (в табл., см. табл., приведены оценки качества двух моделей – Модели 1 и Модели 2, полученных разными путями).

Процедура построения прогнозных значений для высоко волатильных данных также отличается. На данный момент в этом направлении можно выделить следующие области изменений. С одной стороны, это способ получения

¹ Значения стандартного отклонения финансовых инструментов выражаются в относительных от среднего величинах.

прогноза, с другой – представление прогнозной функции.

Если говорить об изменении способа построения прогноза, то он может быть найден не с помощью однократного применения прогнозной функции, а с помощью процедуры скользящего экзамена, т.е. регулярного пересмотра (пересчета параметров) сделанных прогнозов со смещением на определенный ($i = 2$ из-за кусочно-линейного вида p -адической функции) временной интервал периода прогнозирования [13]. Итак, задача оптимизации для нахождения системы p -адических уравнений считается не один, а $(\tau/2)$ раз.

Если говорить об изменении вида прогнозной функции, то прогнозную функцию можно представить либо как единственное уравнение, основанное на p -адических моделях, либо как систему уравнений, также основанных на p -адических моделях. В прогнозную функцию (т.е. если прогноз представить как единственное уравнение) параметры p -адических моделей включаются с учетом весов. В систему p -адических прогнозов включаются те и следующие за ними p -адические модели, отстоящие от даты прогноза на значимый для зависимой (моделируемой) переменной лаг. Данный лаг определяется с помощью частного коэффициента автокорреляции (PACF). Для анализируемых данных оценка PACF является значимой для лага, равного 27.

В таблице, помимо оценок качества моделей, приведены также оценки качества прогнозов, полученных разными путями.

Таблица

Оценка качества (погрешности и точности) p -адических моделей и прогнозов

Вид модели или прогноза	Оценка лог-разности курса	Оценка цены курса	Общая оценка точности
	MAE, приведено к %	MAPE, %	
Модель 1	0,0490%	12,4616%	87,4894%
Модель 2	0,1042%	0,6827%	99,2131%
Прогноз 1	1,7416%	18,7302%	79,5283%
Прогноз 2.1	2,2965%	4,4980%	93,2056%
Прогноз 2	2,6353%	3,7605%	93,6041%
Прогноз 2.(1-2)	2,2019%	3,6610%	94,1371%
Прогноз 2.2	2,5373%	2,8107%	94,6520%
Прогноз 2.(1-2-3)	1,8988%	3,0290%	95,0722%
Прогноз 2.(1-3)	1,7519%	1,5234%	96,7247%
Прогноз 2.3	1,4418%	1,5674%	96,9908%

Примечание.

Модель 1 (общая) получена на основе оптимизации суммы расстояний между исходными и модельными значениями только лог-разности.

Модель 2 (специализированная) получена на основе оптимизации суммы расстояний между исходными и модельными значениями не только лог-разности, но и цены закрытия криптовалюты.

Прогноз 1 (общий) построен на основе Модели 1.

Прогноз 2 (общий) построен на основе Модели 2.

Прогноз 2.1 (специализированный) построен на основе Модели 2 и с использованием

процедуры скользящего экзамена.

Прогноз 2.2 (специализированный) построен на основе Модели 2 и с учетом весов в параметрах Модели 2.

Прогноз 2.3 (специализированный) построен на основе Модели 2 и с определением значимого лага при выборе p -адического уравнения Модели 2.

Прогноз 2.(1-2), Прогноз 2.(1-3) и Прогноз 2.(1-2-3) (специализированные) – комбинированные прогнозы на основе Модели 2.

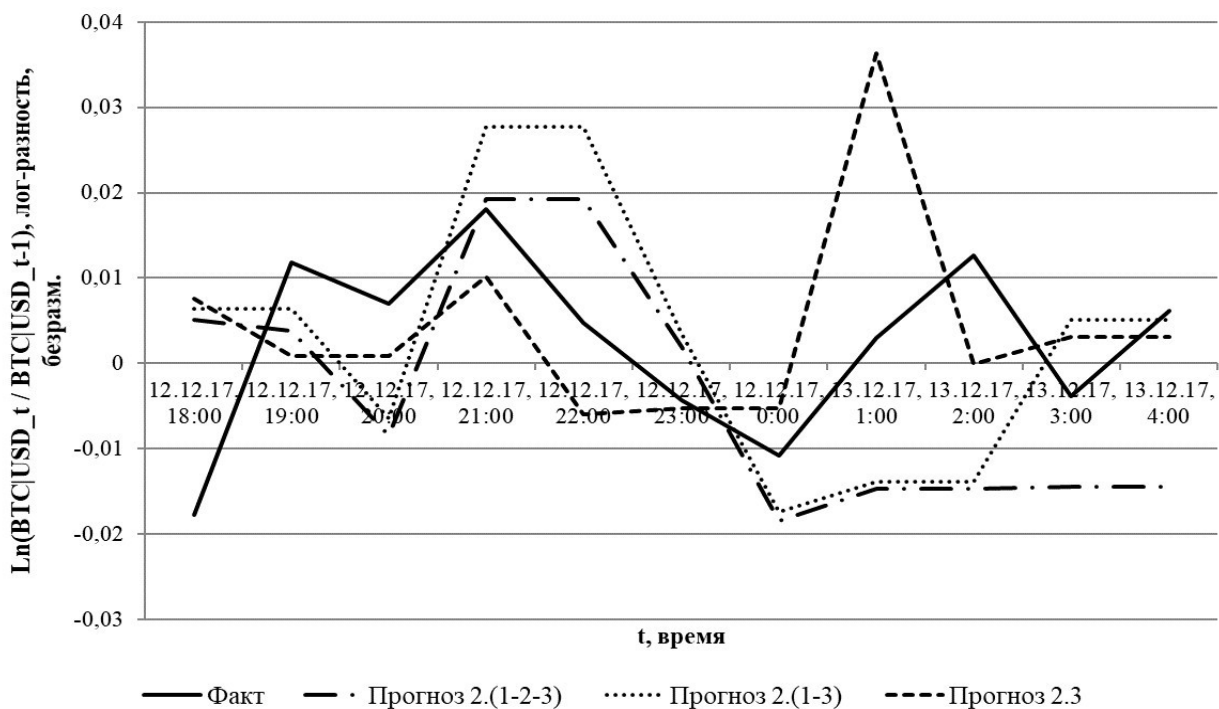


График реальных данных (лог-разности курса Bitcoin) на прогнозный период и прогнозов по Модели 2 (а именно: Прогноза 2.3, Прогноза 2.(1-3) и Прогноза 2.(1-2-3))

Таким образом, в результате исследования для периода моделирования получена специализированная система p -адических уравнений, которая позволяет достовернее описать динамику цены Bitcoin, т.е. оценка качества специализированной системы p -адических уравнений выше на 11,7% по сравнению с общей системой. Для периода прогнозирования сделаны следующие выводы.

1. На основе специализированного p -адического метода прогнозирования в основном (кроме прогноза, основанного только на процедуре скользящего экзамена) получены наиболее приближенные к реальным прогнозные значения, чем на основе общего метода прогнозирования.

2. Среди предложенных доработок p -адического метода прогнозирования «выигрывает» та из них, которая использует значимую оценку частного коэффициента автокорреляции при выборе p -адического уравнения. Так, наилучшие прогнозы были получены либо только с использованием значимого лага (96,99%), либо с использованием, помимо определения значимого лага, еще и процедуры скользящего экзамена (96,72%) или и с использованием процедуры скользящего экзамена, и с учетом весов в параметрах модели (95,07%).

3. Визуально (см. рисунок) графики p -адических прогнозов отражают

больше краткосрочную динамику (т.е. скачки в цене) изменений цены криптовалюты, нежели его долгосрочную тенденцию. Также видно (см. рис.), что прогнозные значения получаются даже более волатильными, чем фактические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nakamoto S.* Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [Electronic resource]. URL: <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (date of access: 10.08.2018).
2. Блокчейн на пике хайпа: правовые риски и возможности / А.Ю. Иванов (рук. авт. колл.), М.Л. Башкатов, Е.В. Галкова и др.; НИУ «Высшая школа экономики», Ин-т права и развития ВШЭ. Сколково. 2-е изд. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2018. 237 с.
3. *Bartos J.* Does Bitcoin follow the hypothesis of efficient market? // *Int. J. of Economic Sciences*. 2015. Vol. IV. №. 2. pp. 10–23.
4. *Charles A, Darné O.* Volatility estimation for Bitcoin: Replication and extension [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/322861075_Volatility_estimation_for_Bitcoin_Replication_and_extension (date of access: 10.08.2018).
5. *Kristoufek L.* BitCoin Meets Google trends and Wikipedia: quantifying the relationship between phenomena of the Internet era // *Scientific reports*. 2013. Vol 3. pp. 1–7.
6. *Garcia D., Tessone C. J., Mavrodiev P., Perony N.* The digital traces of bubbles: feedback cycles between socio-economic signals in the Bitcoin economy // *Journal of the Society Interface*, 2014. № 11 (99).
7. *Kancs D. A., Ciaian P., Rajcaniova M.* The Digital agenda of virtual currencies. Can Bitcoin become a global currency? [Electronic resource]. URL: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97043/the%20digital%20agenda%20of%20virtual%20currencies_final.pdf (date of access: 10.08.2018).
8. *Bouoiyour J., Selmi R.* What does Bitcoin look like? // *Annals of Economics and Finance*. 2015. Vol. 16 (2). pp. 449–492.
9. *Bouoiyour J., Selmi R.* Bitcoin: a beginning of a new phase? // *Economics Bulletin*. 2016. Vol. 36 (3). pp. 1430–1440.
10. *Kristoufek L.* What are the main drivers of the bitcoin price? Evidence from wavelet coherence analysis // *Plos ONE*. 2015. Vol. 10 (4).
11. *Nakano M., Takahashi A., Takahashi S.* Bitcoin technical trading with artificial neural network // *Statistical Mechanics and its Applications*. 2018. Vol. 510. pp. 587–609.
12. *Ахуньянова С. А., Симонов П. М.* Моделирование и прогнозирование на финансовых рынках с помощью эконометрики и эконофизики монография / С.А. Ахуньянова, П.М. Симонов. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. 203 с. [Электронный ресурс]: URL: <https://elis.psu.ru/node/486405> (дата обращения: 15.08.2018).
13. *Дорохов Е. В.* Моделирование динамики отечественного рынка акций // *Финансы и Бизнес*. 2007. № 2. С. 4–25.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКОВ ПРИ ИНВЕСТИРОВАНИИ В КРИПТОВАЛЮТЫ

Л. П. Бакуменко, В. О. Сосков

Марийский государственный университет, Йошкар-Ола, Россия
E-mail: lpbakum@mail.ru, vsmagic@yandex.ru

Данная статья посвящена вопросам изучения криптовалюты в качестве инвестиционного инструмента для диверсификации рисков. Проведено сравнение криптовалют с тради-