

КРИПТОМИР И ЦИФРОВЫЕ ФИНАНСЫ / CRYPTO-WORLD AND DIGITAL FINANCE

Редактор рубрики Р. А. Григорьев / Rubric editor R. A. Grigoryev

Научная статья

<https://doi.org/10.21202/2782-2923.2024.1.88-104>

УДК 336.7:004

JEL: E4, G1, G2, L86

С. А. Андрюшин¹

¹ Институт экономики Российской академии наук, г. Москва, Россия

Токенизация реальных активов: классификация, платформы, приложения, возможности и проблемы развития

Андрюшин Сергей Анатольевич, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики РАН

E-mail: sandr956@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2620-8515>

Web of Science Researcher ID: <http://www.researcherid.com/rid/N-7005-2017>

eLIBRARY SPIN-код: 9666-6701

Аннотация

Цель: обзор литературы и базовых характеристик процесса токенизации активов; уточнение типов классификации токенов; определение этапов моделирования процесса токенизации активов; анализ приложений протоколов экосистемы децентрализованных финансов; исследование возможностей и системных преимуществ токенизации активов; изложение проблем, возникающих в процессе токенизации активов; разбор факторов роста эффективности токенизации активов.

Методы: в статье использованы эмпирический, исторический, логический, страновой, корпоративный, сравнительный и статистический методы экономического анализа, позволяющие изучать особенности развития процесса токенизации активов в условиях цифровой трансформации современной экономики.

Результаты: раскрыты базовые характеристики процесса токенизации активов; определены типы стандартизируемых токенов, участвующих в процессе токенизации активов; рассмотрены этапы развития процесса токенизации активов; показаны варианты использования приложений децентрализованных финансов в условиях токенизации активов; исследованы возможности процесса токенизации за счет формирования новых форм инвестиций, повышенного уровня финансовой доступности, прозрачности и компонуемости токенизированных активов; проанализированы проблемы процесса токенизации активов; сделан разбор факторов роста эффективности токенизации активов в условиях кроссчейн-совместимости различных типов блокчейнов.

Научная новизна: в статье показано, что токенизация активов – это процесс трансформации учета и управления активами, при котором каждый актив представляется в виде программируемого цифрового токена; токенизация – это новая форма создания дополнительной ликвидности за счет расширения в обращении незадействованных неликвидных активов. Токенизация гарантирует большую прозрачность в отношении прав на реальные активы и историю владения этими правами; способствует росту эффективности транзакций за счет снижения операционных расходов, включая издержки, связанные с управлением, выпуском токенов и возможными формами посредничества;

получая доступ к приложениям экосистемы *DeFi*, позволяет расширять потенциал финансового рынка за счет дробления и компонуемости токенизированных активов. Все проблемы в процессе токенизации активов связаны с трилеммой блокчейна, когда нельзя одновременно совместить децентрализацию, безопасность и масштабируемость. Трилемма блокчейна в настоящее время становится набором возможных компромиссов, которые могут сохранять все три свойства блокчейна, но на разных уровнях их совместимости. Для формирования набора возможных компромиссов необходимо разработать теорию функциональной совместимости, которая должна строиться на совместимости таких факторов, как анонимность и конфиденциальность, безопасность и сохранность прав на токенизированные активы.

Практическая значимость: основные положения и выводы статьи могут быть использованы: для разработки сценариев развития процессов токенизации активов в условиях цифровой трансформации современной экономики; анализа приложений протоколов экосистемы децентрализованных финансов; роста эффективности токенизации активов в условиях кроссчейн-совместимости различных типов блокчейнов; изучения дополнительных возможностей и системных преимуществ в результате дробления и компонуемости токенизированных активов; исследования проблем, возникающих в процессе токенизации активов, а также поиска дополнительных факторов роста эффективности процесса токенизации активов.

Ключевые слова:

реальные активы, анонимность, безопасность, блокчейн, децентрализованные финансы, компонуемость, конфиденциальность, масштабируемость, цифровые платформы, приложения, прозрачность, протоколы, сервисы, смарт-контракты, совместимость, токены, токенизация активов

Статья находится в открытом доступе в соответствии с Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), предусматривающем некоммерческое использование, распространение и воспроизводство на любом носителе при условии упоминания оригинала статьи.

Как цитировать статью: Андрюшин, С. А. (2024). Токенизация реальных активов: классификация, платформы, приложения, возможности и проблемы развития. *Russian Journal of Economics and Law*, 18(1), 88–104. <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2024.1.88-104>

Scientific article

S. A. Andryushin¹

¹ *Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Tokenization of real assets: classification, platforms, applications, opportunities and challenges of development

Sergey A. Andryushin, Dr. Sci. (Economics), Professor, Chief Researcher, Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences
E-mail: sandr956@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2620-8515>
Web of Science Researcher: <http://www.researcherid.com/rid/N-7005-2017>
eLIBRARY SPIN-код: 9666-6701

Abstract

Objective: literature review and basic characteristics of the asset tokenization; clarification of the types of token classification; identification of the stages of modeling the asset tokenization; analysis of applications of decentralized finance ecosystem protocols; study of the opportunities and systemic advantages of asset tokenization; presentation of the problems arising in the asset tokenization; analysis of the factors of asset tokenization efficiency growth.

Methods: the article uses empirical, historical, logical, country-specific, corporate, comparative and statistical methods of economic analysis to study the peculiarities of the asset tokenization development in the digital transformation of modern economy.

Results: the basic characteristics of the asset tokenization are disclosed; the types of standardized tokens involved in the asset tokenization are defined; the stages of the asset tokenization development are considered; the options of using decentralized finance applications under asset tokenization are shown; the opportunities of tokenization through the new forms of investment, increased financial accessibility, transparency and componentization of tokenized assets are studied; the problems of tokenization are analyzed; the factors of asset tokenization efficiency growth under the cross-chain compatibility of different types of blockchains are analyzed.

Scientific novelty: the article shows that asset tokenization is a process of accounting and asset management transformation, in which each asset is represented in the form of a programmable digital token; tokenization is a new form of creating additional liquidity by expanding the circulation of idle illiquid assets. Tokenization guarantees greater transparency regarding the rights to real assets and the history of ownership of these rights; it contributes to transaction efficiency by reducing transaction costs, including costs associated with management, token issuance and possible forms of intermediation. By accessing the applications of the DeFi ecosystem, it allows the expansion of financial market potential through the fragmentation and compartmentalization of tokenized assets. All the challenges in the asset tokenization are related to the blockchain trilemma, where decentralization, security and scalability cannot be implemented together. The blockchain trilemma is now becoming a set of possible trade-offs that can preserve all three properties of the blockchain, but at different levels of compatibility. To form a set of possible trade-offs, it is necessary to develop a theory of interoperability, which should be built on the compatibility of factors such as anonymity and privacy, security and preservation of rights to tokenized assets.

Practical significance: the main provisions and conclusions of the article can be used: to develop scenarios for the asset tokenization development under the digital transformation of modern economy; to analyze the applications of the decentralized finance ecosystem protocols; to increase the efficiency of asset tokenization under the cross-chain compatibility of different types of blockchains; to study additional opportunities and systemic advantages as a result of fragmentation and compatibility of tokenized assets; to study the problems arising in the asset tokenization; and to search for additional growth factors for the asset tokenization efficiency.

Keywords:

real assets, anonymity, security, blockchain, decentralized finance, compatibility, privacy, scalability, digital platforms, applications, transparency, protocols, services, smart contracts, interoperability, tokens, asset tokenization

The article is in Open Access in compliance with Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), stipulating non-commercial use, distribution and reproduction on any media, on condition of mentioning the article original.

For citation: Andryushin, S. A. (2024). Tokenization of real assets: classification, platforms, applications, opportunities and challenges of development. *Russian Journal of Economics and Law*, 18(1), 88–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2024.1.88-104>

Введение

В настоящее время токенизация активов становится новым мейнстримом современной экономики. Она открывает дополнительные инвестиционные возможности для населения, не имеющего доступа к услугам банковского сектора¹. Токенизация связана с информационными технологиями, такими как смарт-контракты, криптография и технология блокчейна. Эти технологии способны провести дробление активов, оцифровать их в токены или цифровые сертификаты (права) собственности, имеющие реальную рыночную стоимость. Поэтому процесс токенизации активов представляет собой многообещающее решение по преобразованию различных групп активов (прав на активы) в уникальное цифровое представление под названием «токен».

Токенизация активов распространяется практически на любой объект, включая реальные активы (недвижимость, товары, валюты, ценные бумаги, интеллектуальную собственность и пр.), цифровые активы (права управления в DAO, межсетевые активы и пр.) и игровые активы (скины или внутриигровые валюты)².

¹ The World Bank. (2021). The Global Findex Database 2021. <https://www.worldbank.org/en/publication/globalfindex/Report>

² Asset Tokenization: What It Is and How It Works. (2023, December 14). Chainlink. <https://chain.link/education/asset-tokenization>

И это очень большие средства. Так, токенизация только реальных активов (а это сегодня более 867 трлн долл. США) способна сделать мировой рынок криптоиндустрии современным драйвером экономического роста³. По оценкам Всемирного экономического форума (WEF), к 2027 г. до 10 % мирового ВВП будет связано с токенизированными активами, которые к этому времени потенциально могут вырасти до 24 трлн долл. США⁴. Поэтому неслучайно изучением этого нового экономического феномена стали активно заниматься не только ученые, но и ведущие бизнес-структуры мировой экономики, такие как *Microsoft* и *Vanguard*, *Boston Consulting Group* и *ADDX*, *BlackRock* и *Deloitte*, *BNY Mellon* и *EY*.

В настоящее время идеальным испытательным полигоном для токенизации активов становятся финансовый сектор и страны Азии, первыми в мире осознавшие преимущества активов, связанных с токенизацией. Показательный пример – *HSBC Singapore*, *Cargill* и *ING*, которые в мае 2018 г. осуществили транзакцию реального торгового финансирования на масштабируемой блокчейн-платформе *R3 Corda*. Через год, в ноябре 2019 г., *HSBC Singapore* объявила о партнерстве с *SGX* и *Temasek*, чтобы начать выпуск и обслуживание ценных бумаг с фиксированным доходом⁵.

Планируется, что на Азиатско-Тихоокеанский регион (далее – АТР) будет приходиться подавляющее число (90 %) пользователей из общего числа (2,4 млрд чел.) новых пользователей, вступающих в мировую экономику в 2027 г. Основная часть этого роста будет связана с рынками Китая, Индии и стран всей Юго-Восточной Азии (Schwab, 2019). Здесь будет проживать наибольшее количество интернет-пользователей⁶, население будет активно использовать криптовалюты⁷ и безналичные платежи⁸. Учитывая быстрорастущую цифровую доступность населения (особенно за счет увеличения количества владельцев смартфонов⁹) в АТР, мы считаем, что этот рынок будет обладать огромным и уникальным потенциалом для развития токенизации активов.

В статье будут рассмотрены только реальные активы, процесс токенизации которых изложен в следующих параграфах: 1. Базовые характеристики токенизации активов и обзор литературы. 2. Классификация токенизированных активов. 3. Моделирование процесса токенизации активов. 4. Приложения децентрализованных финансов. 5. Возможности токенизации активов. 6. Проблемы токенизации активов. 7. Факторы роста эффективности токенизации активов.

1. Базовые характеристики токенизации активов и обзор литературы

Токенизация – это процесс трансформации учета и управления активами, при котором каждый актив представляется в виде программируемого цифрового токена. Причем суть токенизации связана с созданием цифровых аналогов реальных активов с целью быстрой, экономной и безопасной работы с ними (Андрюшин, 2019, с. 286). При этом программируемые токены могут представлять собой небольшую часть (долю) любого реального актива. Это позволяет повысить капитализацию рынка за счет токенизации долевого владения ликвидными и неликвидными активами, например, такими как недвижимость, ценные бумаги, интеллектуальная собственность или произведения искусства, традиционно требующими более высоких капитальных вложений¹⁰.

Токенизация активов по сути становится аналогична краудфандингу, в рамках которого возникает новый класс инвесторов, финансирующих или покупающих актив с относительно низким уровнем собственного

³ Tokenized Real-World Assets (RWAs): Scaling Onchain Finance to a Global Level. (2023, February 18). Chainlink. <https://blog.chain.link/tokenized-real-world-assets/>

⁴ World Economic Forum. (2015, September.). Deep Shift. Technology Tipping Points and Societal Impact. Survey. Report. http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf

⁵ The 10x potential of tokenization. (2020, August). HSBC. <https://www.gbm.hsbc.com/insights/securities-services/distributed-ledger-technology>

⁶ Our research and content philosophy. Statista. <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment>

⁷ Buchholz, K. (2021, March 17). How Common is Crypto? <https://www.statista.com/chart/18345/crypto-currency-adoption/>

⁸ Roper, W. (2020, January 24). Asia Leading the Cashless Revolution. URL: <https://www.statista.com/chart/20618/cashless-payments-across-the-world/>

⁹ Kakihara, M. (2015, October). Measuring Asia's Mobile Transformation. <https://www.thinkwithgoogle.com/intl/en-apac/tools-resources/research-studies/measuring-asias-mobile-transformation/>

¹⁰ Такое дробление делает участие на фондовых рынках гораздо более доступным для гораздо большей части населения. Например, дробление акций (до 1/10 или 1/100) таких крупных компаний, как *Apple* или *Amazon*, позволило бы мелким инвесторам стать небольшим совладельцем этих компаний.

капитала. И если на традиционные активы их владельцы обычно предоставляют покупателям определенные стимулы, такие как скидки за неликвидность, снижающие их цену, то токенизация активов, напротив, повышает ликвидность актива, поскольку предлагает дробное владение, устраняя при этом какие-либо скидки за неликвидность. Более того, продажа небольших долей (прав) собственности (ценных бумаг или недвижимости) позволяет ее владельцам устанавливать более справедливую рыночную цену на этот актив.

Ожидается, что токенизация уменьшит фрагментацию традиционной финансовой системы, повысит прозрачность, обеспечит соблюдение требований (стандартов), облегчит построение необходимой инфраструктуры и расширит доступ значительных групп населения к традиционным финансовым рынкам. Хотя все эти преимущества еще окончательно не подтверждены, но первые результаты процесса токенизации уже налицо.

Так, в одних публикациях утверждается, что токенизированные облигации, по сравнению с обычными облигациями традиционного рынка, гарантируют пользователям как более низкую стоимость заимствования, так и повышенную ликвидность, привлекаемую с токенизированного рынка (Leung et al., 2023). В других – аргументированно объясняются плюсы токенизации, связанные с отдельными компонентами новой торговой инфраструктуры – депозитарием (учетом и хранением активов), криптобиржей (процессом торгов токенизированными активами), расчетным центром (платформой для создания токенов и операций с ними) и клиентским софтом (клиентскими кошельками) (Auer et al., 2021). В третьих публикациях анализируются инклюзивные свойства токенизированных активов, способных увеличить скорость и безопасность транзакций, наличие сетевого эффекта и удобства проведения операций, а также отсутствие потребности для одноранговых сетей любых форм посредничества, процессов монополизации и корректировки транзакций, вносимых в реестр распределенной сети блокчейна (Lacity & Treiblmaier, 2022).

В работах большинства авторов часто анализируются недостатки токенизации активов. Самая большая проблема, выделяемая в работах этих авторов, связана как с анонимностью транзакций, так и с конфиденциальностью пользователей (и их кошельков), что позволяет допускать к процессу токенизации всевозможных преступников и мошенников. Эти авторы считают, что процессы токенизации активов должны всегда активно сопровождаться процедурами KYC¹¹/AML¹², полной идентификацией клиентов и их кошельков, а также централизованной регуляцией клиентских транзакций и всех потребляемых ими финансовых услуг (Aldasoro et al., 2023). В настоящее время эта проблема решается путем ограничения круга инвесторов, способных переводить свои активы в цифровую форму, правила управления которой принадлежат узкому кругу стейкхолдеров (*stakeholders*).

Важной проблемой, исследуемой в публикациях, является проблема, связанная со стандартизацией процессов токенизации. Очень часто многие исследователи токенизацию ассоциируют с типом блокчейна: публичным или частным. Но это не совсем верное объяснение. Публичный или частный блокчейн – это формы получения, обмена и хранения информации об активе, но не сам многофункциональный процесс токенизации актива (Carapella et al., 2023). Иначе говоря, процесс токенизации есть сочетание взаимосвязанных между собой систем управления: систем пользователей, валидаторов, оракулов и администраторов; систем выпуска, обращения, вывода токенов из оборота, депонирования и секьюритизации токенов; системы управления финансовыми и технологическими рисками, соблюдения принципов KYC/AML и обеспечения аудита смарт-контрактов; систем управления комиссиями и лимитами, связанных с мобильными и веб-приложениями, установками биржевого модуля и децентрализованными биржами¹³.

¹¹ KYC (*Know Your Customer*) – термин «Знай своего клиента» – используется для регулирования финансовых институтов и букмекерских контор, а также других компаний, работающих с деньгами частных лиц, и означает, что они должны идентифицировать и устанавливать личность контрагента, прежде чем позволять ему проводить финансовую операцию.

¹² AML (*Anti-Money Laundering*) – борьба с легализацией денежных средств, включающая в себя комплекс мер, направленных на предотвращение использования финансовой системы страны или конкретной финансовой организации для легализации средств, полученных преступным путем, или финансирования терроризма. Разработкой и внедрением данных мер и инструментов занимаются международные и национальные институты, банковское и прочее деловое сообщество.

¹³ Кравченко, П. (2017, 17 октября). Токенизация активов как способ повышения их ценности. ForkLog. <https://forklog.com/exclusive/tokenizatsiya-aktivov-kak-sposob-povysheniya-ih-tsennosti>

2. Классификация токенизированных активов

Токен имеет идентификатор, набор связанных с ним определяющих свойств (запрограммированных правил) и защищен криптографически. Согласно Международной организации по стандартизации¹⁴, все токены классифицированы в следующие типы¹⁵:

- взаимозаменяемый токен (*Fungible token, FT*) – это токен, способный к взаимной замене между токенами одного и того же типа. Это когда каждая единица токенизированного актива имеет одинаковую рыночную стоимость и юридическую силу. Например, все единицы 1 биткоин (далее – *BTC*) в 1 доллар США абсолютно одинаковы. При этом не имеет значения, у кого был куплен *BTC*, поскольку все единицы *BTC* имеют одинаковую функциональность и являются частью одной распределенной сети;

- невзаимозаменяемый токен (*Non-Fungible token, NFT*) – это когда один токен нельзя заменить токенами того же типа, поскольку каждый токен представляет собой уникальное значение, представляющее такие реальные активы, как произведения искусства (картины, антиквариат) или недвижимость. Каждый токен содержит уникальную информацию и собственные атрибуты. *NFTs* обычно не делятся, хотя *F-NFTs* предлагают долевое владение *NFTs*, например, в случае уникального дорогостоящего произведения искусства или коммерческой недвижимости;

- секьюрити/инвестиционный токен (*Security token, ST/Investment token, IT*) – токен с особыми характеристиками, соответствующими определению финансового инструмента или другого инвестиционного актива согласно требованиям действующего законодательства соответствующей юрисдикции. Эти токены предназначены для представления полных или частичных прав собственности на активы, они сталкиваются с рядом ограничений в отношении юрисдикции, категории активов и идентификации личности. Как правило, данные типы токенов могут выступать в различных формах: в форме токенизированных акций (*Equity tokens*)¹⁶, токенизированных долгов (*debt tokens*)¹⁷, токенов, обеспеченных активами (*Asset-backed tokens*)¹⁸ или токенов, гарантирующих дивиденды (*Dividend tokens*)¹⁹;

- утилитарный токен (*Utility token, UT*) – токен, который может использоваться его владельцем для получения доступа к товарам и/или услугам, а также выступать в качестве средства обмена внутри определенного сообщества. Данные токены в основном связаны с публичным блокчейном *Ethereum* и не предназначены для инвестиций. Такие токены могут использоваться как в роли средства оплаты (*Pay token*²⁰) и средства расчетов (*Settlement token*²¹), так и в роли владения (*Ownership token*²²), управления (*Governance token*²³) или

¹⁴ Тип токена задается стандартами (*ERC-20, ERC-721, ERC-1155, ERC-1400, ERC-1594, ERC-1644* и т. д.), на основании которых выбираются тип токена, пределы эмиссии (количество токенов в обращении), механизм управления токеном, а также другие пользовательские настройки, параметры и наборы правил. Например, *ERC-1400* является стандартом для *security token*, построенного исключительно на блокчейне *Ethereum*.

¹⁵ Blockchain and Distributed Ledger Technologies – Vocabulary. (2023, January). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22739:dis:ed-2:v1:en>

¹⁶ *Equity token* представляет собой часть токенизированной акции компании, с помощью него инвесторам удобнее управлять и проще контролировать свои права и привилегии, связанные с владением ценными бумагами компании.

¹⁷ *Debt token* (долговой токен) – это токенизированный актив, представляющий собой долговые ценные бумаги (кредиты, облигации, депозитные сертификаты и пр.), записанные в блокчейне с использованием смарт-контракта, содержащего все условия обращения данных токенов, в том числе условия погашения и факторы риска основного долга.

¹⁸ *Asset-backed token* представляет из себя торгуемый актив, классифицируемый как токен безопасности, обращающийся на рынке ценных бумаг. Он является цифровым двойником реального (физического) актива или определенной услуги, выступающих в качестве его обеспечения.

¹⁹ *Dividend token* (деривативный токен) дает его держателю пассивный доход, но в то же время такой токен может, как и любая акция, как предоставлять, так и не предоставлять право голоса его держателю.

²⁰ *Pay token* (платежный токен) представляет собой цифровое представление стоимости, которое не создается центральным банком или любым другим государственным органом. Он не является законным средством платежа, но может использоваться в системе расчетов в качестве обеспеченного и необеспеченного средства платежа (ЕБА, 2014).

²¹ *Settlement token* (расчетный токен), который, согласно классификации Международной ассоциации стандартизации токенов (*ITSA*), предназначен для осуществления расчетов по транзакциям, таким как покупка товаров или услуг в экосистеме внешней, третьей стороны (*third-party ecosystem*). International Token Standardization Association (*ITSA*). (2019). www.itsa.global

²² *Ownership token* (токен владения) создан с целью управления и передачи права собственности на материальные или нематериальные активы.

²³ *Governance token* (токен управления) предоставляет его пользователю права на участие в управлении сервисом (протоколом), для которой был создан токен, например, право голоса.

доступа (*Access token*²⁴) к товарам и/или услугам. Для создания таких токенов нужен смарт-контракт, а порой и несколько, чтобы пройти различные стадии токенизации – от предпродажи до основной стадии продаж, а возможно, и для обратного выкупа токенов;

– гибридный токен (*Hybrid token, HT*), сочетающий в себе элементы утилитарного и инвестиционного токенов, а также всех их разновидностей (платежного, валютного, дивидендного, долгового и обеспеченных активами токенов).

Таким образом, токенизированный актив – это цифровая форма того или иного актива или прав владения на него, представленного в сети. При этом создаваемые токены могут действовать как цифровые сертификаты собственности (например, на золотые слитки или объекты недвижимости), которые могут представлять практически любой реальный объект, включая физические (*physical*), цифровые (*digital*), взаимозаменяемые (*fungible*) и невзаимозаменяемые активы (*non-fungible assets*). Поскольку токены хранятся в блокчейне, то их владельцы могут давать их держателю право требования на реальный актив. Иначе говоря, токенизация активов позволяет создавать, хранить, закладывать, продавать, использовать и ликвидировать активы в распределенных сетях блокчейнов.

3. Моделирование процесса токенизации активов

Моделирование процесса токенизации активов связано с пошаговым набором компонентов, необходимых для реализации этого процесса. Первый шаг – это определить актив, который мы собираемся токенизировать. Это могут быть товары (золото, зерно, нефть), объекты недвижимости (здания, земля), валюты, ценные бумаги (акции, облигации, деривативы), произведения искусства (картины, антиквариат), кредиты (займы, свопы), интеллектуальная собственность или бренды компаний. После того как мы определили актив, который хотим токенизировать, нам необходимо будет определить тип токена, который мы собираемся создать. При этом нам нужно будет учитывать такие факторы, как стандарт токена (*ERC-20, ERC-721, ERC-1155* и т. д.), который мы хотим использовать на блокчейне, количество создаваемых токенов, механизм управления этими токенами и прочие пользовательские настройки, связанные с параметрами и правилами обращения токенов (Giungato et al., 2021).

Все это алгоритмически прописывается в смарт-контрактах, предписывающих последовательность решений на основе заранее определенных критериев, не требующих участия посредников (человека). Далее нам необходимо будет определить тип самого блокчейна, в котором будут выпущены токены. Сюда могут входить такие блокчейны, как *Bitcoin, Ethereum, Corda (R3), Tezos, NEO, Stellar EOS, WeOwn* и др. Выбор в пользу того или иного типа блокчейна будет зависеть от конкретных требований рассматриваемого токенизированного актива, а значит, нужно на этом этапе учитывать некоторые логические аспекты: следует ли выпускать токены в публичном (*public blockchain*) или узком, разрешенном блокчейне (*a permissioned blockchain*) или использовать структуру для создания собственной сети или объединения централизованных и децентрализованных форматов.

В дальнейшем нам необходимо будет определиться с выбором стороннего аудитора (оракула, координатора), кто способен будет передавать в блокчейн необходимую информацию, которая хранится вне распределенной сети. Данная информация должна гарантировать, что количество выпущенных токенов соответствует стоимости базовых активов, находящихся вне цепочек блокчейна²⁵. При этом любые проекты токенизированных активов могут использовать децентрализованную службу проверки *Chainlink Proof of Reserve (PoR)*, которая интегрирована в их протоколы, чтобы обеспечить передачу более объективной информации в цепочку сети блокчейна. В качестве примера можно назвать такие протоколы, как *OpenEden* для токенизированных казначейских векселей, *TUSD* и *Poundtoken* для токенизированной фиатной валюты или *CCIP* – протокол межсетевого взаимодействия, предназначенный для коинтеграции приложений децентрализованных финансов.

²⁴ *Access token* (токен доступа) дает право его пользователю использовать определенные услуги, товары или ресурсы, предлагаемые в среде, для которой был создан такой токен.

²⁵ How to Tokenize an Asset: A Step-by-Step Guide to Asset Tokenization. (2023, November 30). ChainLink. <https://chain.link/education-hub/how-to-tokenize-an-asset>

4. Приложения децентрализованных финансов

Появление публичных блокчейнов без разрешения (*the emergence of permissionless, public blockchains*) породило целую систему приложений децентрализованного финансирования (*DeFi*)²⁶, формируемых смарт-контрактами и стандартизированными токенами. Ряд фундаментальных исследований в области *DeFi* (Werner et al., 2021) служит этому подтверждением. Все приложения *DeFi* работают на цифровых платформах²⁷, функционируют автоматически по запрограммированным алгоритмам, кодам без вмешательства финансовых организаций. Они доступны для проверки их пользователями в режиме реального времени и могут с помощью криптографических инструментов довольно легко объединяться с другими приложениями экосистемы *DeFi*, способствуя развитию процесса токенизации активов в реальной экономике.

На начало 2023 г. самыми востребованными платформами в экосистеме *DeFi* являлись *Ethereum*, *BSC*, *Polygon*, *Avalanche*, *Fantom*, *Arbitrum*, *Optimism*, *Salona* и *Tron*. При этом наибольшее количество приложений существовало на *Ethereum* (614), *BSC* (513), *Polygon* (384) и *Avalanche* (277). Эти приложения были сосредоточены в таких протоколах, как *Dexes* (где можно обменивать и/или торговать криптовалютой), *Lending* (позволяющий пользователям брать и предлагать кредиты), *Liquid Staking* (размещающий активы в обмен на вознаграждение, а также ордера по стейкингу для продажи), *CDP* (выпускающий обеспеченные стейблкоины), *Bridge* (соединяющий токены разных сетей), *Yield* (позволяющий выплачивать вознаграждения за стейкинг или ликвидность пользователя платформы), *Services* (предоставляющий сервис пользователю), *Derivatives* (для производства сделок с кредитным плечом), *Algo-Stables* (запускающий алгоритмические стейблкоины), *Cross-Chain* (добавляющий совместимость между разными блокчейнами), *Options* (дающий право приобрести актив по фиксированной цене), *Privacy* (гарантирующий анонимность осуществляемых транзакций) и *Payments* (предлагающий производство оплаты/отправки/получения криптовалюты)²⁸.

Именно эти криптографические протоколы играют в настоящее время наибольшую роль в процессе токенизации активов, поскольку они позволяют приложениям децентрализованных финансов (*DeFi*) сохранять конфиденциальность и анонимность совершаемых пользователями транзакций. Публичный характер блокчейна позволяет ввести в расчеты дополнительные стимулы (*MEV*²⁹), которые бросают вызов как безопасности приложений *DeFi*, так и конфиденциальности всех пользователей. Однако внедрение миксеров криптоактивов³⁰, основанных на доказательствах *ZK-SNARK* в блокчейне, привело к появлению приложений *DeFi*, ориентированных на сохранение конфиденциальности и открывающих новые подходы к смягчению последствий от стимулов *MEV*. Также в последнее время разработчиками было предложено приложение *DeFi*, регулирующее исполнение заказов пользователей с применением методов многосторонних вычислений (*multi-party-computation techniques*) (Baum et al., 2021), что позволяет повысить эффективность токенизации активов за счет этих приложений *DeFi*. Кроме того, совершенствование криптографических протоколов *DeFi* способно в разы улучшить масштабируемость транзакций, поскольку многие из них перешли на *ZK-роллапы* (*ZK-rollups*)³¹, позволяющие обмениваться данными и передавать токенизированные активы между разными блокчейнами.

Совершенствование криптографических протоколов позволило повысить эффективность функционирования таких базовых приложений *DeFi*, как кредитные пулы (*Lending Pools*, *LPs*) и автоматические маркет-мейкеры (*Automatic Market Makers*, *AMMs*). На эти изменения в приложениях *LPs* и *AMMs* указали в своих публикаций зарубежные исследователи М. Бартолетти, Дж. Синь-Ю Чан и А. Ллуч-Лафуэнте (Bartoletti et al., 2021a; 2021b).

²⁶ ERC-20 token standard. (2015). <https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-20.md>

²⁷ Перечислим наиболее известные платформы: *OpenSea* (лидер отрасли в создании и торговле *NFT*, открывающий возможности для токенизации активов в нескольких сферах); *Harbor* (концентрируется на токенизации активов недвижимости, чтобы повысить доступность долевого владения для большей группы пользователей); *Securitize* (предоставляет полный спектр решений по токенизации активов в различных секторах, таких как ценные бумаги, изобразительное искусство и предметы коллекционирования); *Alchemy* (предоставляет инвесторам полезную информацию, основанную на данных и аналитике для токенизированных активов); *Polymath* (платформа, позволяющая эмитентам создавать токенизированные ценные бумаги и управлять ими).

²⁸ Top protocols. Defi Llama. <https://defillama.com/top-protocols>

²⁹ *MEV* (*miner-extractable-value*) – способность майнеров извлекать ценность, помимо комиссий за транзакции из определенных последовательностей действий, в *DeFi*, которая была обозначена как извлекаемая майнером ценность (Daian et al., 2020).

³⁰ Что такое zk-SNARKs и zk-STARKs? Binance academy. <https://academy.binance.com/ru/articles/zk-snarks-and-zk-starks-explained>

³¹ Starkware. (2021). <https://starkware.co/>

Кредитные пулы (*LPs*) как децентрализованные приложения позволяют взаимно не доверяющим пользователям кредитовать друг друга и брать займы криптоактивы. Данные авторы в своих исследованиях попытались формализовать все взаимоотношения между пользователями и *LPs*, раскрывая тем самым особенности экономической природы *LPs*. В частности, модель кредитного пула позволяет сформулировать и раскрыть фундаментальные свойства *LPs*, такие как учет выпущенных на платформе токенов и размер запасов депонированных токенов, необходимый для согласованного обмена и распределения токенов в *LPs*. Одновременно эта модель позволяет рассматривать пользователей *LPs* как рациональных агентов, которые заинтересованы в погашении кредитов в обмен на дисконтированное обеспечение или предоставление процентных депозитов. Авторы привели веские аргументы в пользу разработки стимулов для *LPs*, например, для вкладчиков, которые могут выкупить больше токенов, чем внесли их в кредитный пул. Более того, они формализовали понятие безопасности использования токенов, которое представляет собой некий компромисс между займом и его погашением, регулируемый плавающей процентной ставкой.

М. Бартолетти, Дж. Синь-Ю Чан и А. Ллуч-Лафуэнте также исследовали новые возможности автоматических маркетмейкеров (*AMMs*), позволяющие пользователям обмениваться различными криптоактивами без необходимости поиска валютного посредника. В своих работах они развивают теорию *AMMs*, одним из результатов которой является концепция параллелизма. Данная концепция объясняет взаимосвязанные действия как по открытию депозита, так и по погашению кредита, свидетельствующие о том, что депонированные токены в условиях погашения кредита не могут быть заморожены в приложении *AMMs*. Кроме того, авторы вводят в обращение понятие согласованности стимулов, а именно динамический обменный курс, на который полагаются пользователи приложения *AMMs*. При этом данный курс управляется определенным числом так называемых торговых инвариантов (*trading invariants*), для которых существуют механизмы стимулирования и арбитражная игра, способные провести объективный формальный анализ поведения *AMMs* на рынке токенизированных активов (Bartoletti et al., 2023).

5. Возможности токенизации активов

Токенизация активов открывает широкие возможности для своих пользователей. По сравнению с нетокенизированными активами она позволяет: а) привлечь дополнительную ликвидность за счет расширения в обращении незадействованных неликвидных активов; б) повысить уровень доступности малых и средних групп инвесторов к рынку денег и капиталов; в) обеспечить большую прозрачность в отношении прав на реальные активы и историю владения этими правами; г) повысить эффективность транзакций за счет снижения операционных расходов, включая управление, выпуск и возможные формы посредничества; д) получить доступ к экосистеме *DeFi*, позволяющей повысить потенциал финансового рынка за счет дробления и компонуемости токенизированных активов.

5.1. Создание дополнительной ликвидности

На традиционных финансовых рынках платежные транзакции обычно фиксируются в разрозненных реестрах, что приводит к значительной неэффективности рынков, росту операционных затрат и увеличению времени расчетов. Токенизация активов позволяет решить эти проблемы за счет фиксации транзакций в распределенных реестрах совместимых блокчейнов. Токенизация активов также может способствовать росту ликвидности финансового рынка за счет исторически неликвидных активов. В процессе токенизации любой актив может быть представлен в виде значительного количества токенов, созданных в результате дробления актива на доли (части), которые впоследствии могут быть зарегистрированы на различных платформах и доступных для расчетов на децентрализованных биржах (*DEX*).

Это устранил необходимость в дорогостоящих посредниках и расширит круг потенциальных покупателей, сохраняя привязку эмитируемых токенов к выбранному реальному активу. Более того, активы, которые являются неликвидными, как правило, имеют волатильную рыночную цену. В этом случае владельцы таких активов обычно предоставляют покупателям такие стимулы, как скидки за неликвидность, снижающие цену этого актива. Токенизация активов, напротив, повышает ликвидность актива, поскольку предлагает дробное владение, одновременно устраняя скидки за неликвидность. Кроме того, продажа небольших долей собственности (прав владения) позволяет их владельцам устанавливать более справедливую рыночную цену.

5.2. Повышение уровня финансовой доступности

Многие из наиболее перспективных активов (например, акций крупных компаний) недоступны для мелких и средних инвесторов из-за действующих финансовых или регулятивных ограничений. Но токенизация позволяет этим инвесторам повысить свою доступность к этим активам благодаря диверсификации инвестиционного портфеля компании. Одновременно выгоду от токенизации получают и владельцы самих крупных компаний, позволяя им наращивать активы своих компаний за счет привлечения ликвидности от мелких и средних групп инвесторов³². Короче говоря, токенизация может привести к появлению нового демографического класса инвесторов, создавая для них повышенную доступность и расширяя географию возможных инвестиционных сценариев развития бизнеса во многих странах и регионах.

Поскольку посреднических функций в условиях токенизации больше не требуется, инвесторы получают более гибкие и адекватные для себя формы инвестиционных возможностей. В частности, возможность дробления активов позволяет ввести в обращение такое понятие, как совместная собственность, когда несколько человек могут вместе владеть одним и тем же активом и совместно использовать его. Это является ключевым моментом в новом информационном обществе, члены которого имеют равные права на владение той или иной частью собственности. Например, люди могут за токены, эмитируемые под объект недвижимости, купить дом для совместного отдыха и решить между собой, кто и в какое время будет пользоваться этим домом. Другой пример – это предложение ассоциации *Diem (Facebook)*³³, которая в рамках своего проекта *Diem (Libra)* в 2023 г. предложила своим клиентам приобретать одновалютные стейблкоины (*single currency stablecoins*), расширяя тем самым географию своей капитализации.

5.3. Прозрачность процесса токенизации

Прозрачность изначально включена в процесс токенизации, поскольку содержит всю доступную информацию о каждом владельце и историю всех его транзакций. Благодаря этой беспрецедентной прозрачности, способствующей подотчетности и доверию, инвесторы имеют полную информацию о владении этими активами и транзакциях, связанных с ними. Отсутствие информации особенно остро ощущается при покупке иностранных активов, когда покупатель не может лично изучить интересующий актив перед его приобретением. Наличие прозрачности токенизации, позволяющей открыто отслеживать и проверять все записи, достигается за счет публичного характера многих блокчейнов. С помощью блокчейнов пользователи могут видеть запись в реестре о собственности, а также доход в виде процентов или дивидендов, что автоматически заложено в программируемой логике смарт-контракта на актив. Поэтому прозрачность токенизации позволяет значительно снизить риски мошенничества во многих сферах экономики и финансов, особенно в предметах роскоши, таких как бриллианты, вино и икра, а также в модельном бизнесе и произведениях искусства.

5.4. Компонуемость активов

Одним из наиболее многообещающих преимуществ токенизации активов является компонуемость – соединение стоимости реальных активов с возможностью их компоновки в рамках экосистемы *DeFi*. Компоновке активов предшествует их дробность. Иначе говоря, позволяя дробить активы на доли прав владения, блокчейн в конечном счете создает на рынке большую ликвидность. Децентрализованные денежные рынки вокруг токенизированных реальных активов позволяют пользователям зарабатывать дополнительный доход от процентов, полученных от использования залога вне сети. Это еще больше повышает ликвидность для пространства экосистемы *DeFi*, доступ к которой расширяет инвестиционные возможности розничных инвесторов. В дальнейшем токенизация активов способна раскрыть множество дополнительных возможностей для разработчиков смарт-контрактов, стремящихся получить реальную ценность за счет развития совершенно

³² В конце 2018 г. 588 млн мелких пользователей китайской компании *Alipay* разместили небольшие суммы денег во взаимном фонде *Tianhong Yu'e Bao*, активы которого по состоянию на июнь 2019 г. составляли 150 млрд долл. США. См. Lee, G. (2019, September 27). Ant Financial's Yu'e Bao shrinks 39 per cent, loses top spot as world's biggest money market fund, says Fitch Ratings. South China Morning Post. <https://www.scmp.com/business/banking-finance/article/3030678/ant-financials-yue-bao-shrinks-39-cent-loses-top-spot>

³³ Соцсеть принадлежит *Meta* – организации, признанной экстремистской, ее деятельность запрещена на территории Российской Федерации.

новых типов синтетических активов, индексов и корзин токенов, привязанных к различным активам, а также превращения реальных потоков доходов от токенизации форм залога. Иными словами, компонуемость активов, поддерживая инклюзивное финансирование, открывает для широкого круга инвесторов новый рынок денег и капиталов. При этом одноранговая торговля (*peer-to-peer trading*) предлагает частным инвесторам безопасную и надежную инфраструктуру, одновременно сопровождая это большей свободой, внутренним контролем и необходимой для рынка прозрачностью.

5.5. Новые формы сбора средств инвесторов

Рост популярности токенизации активов устраняет разрыв между традиционными и новыми рынками капитала. Предложение токенов безопасности (*Security Token Offering, STO*) – это новая форма сбора средств в условиях токенизации. Данные средства отличаются от венчурного капитала (*Venture Capital, VC*), первичного публичного размещения акций (*Initial Public Offering, IPO*) и первичного размещения монет (*Initial Coin Offering, ICO*).

Венчурные капиталисты обычно стремятся инвестировать в многообещающие стартапы, а также в малые и средние предприятия, которые имеют потенциал стать публичными или частью более крупной компании. При этом венчурные капиталисты выдвигают такие условия, которые часто более выгодны для них самих, чем для владельцев малого и среднего бизнеса.

Для массового инвестора рынок *IPO* не подходит, так как он строго регулируется и является очень дорогостоящим и трудоемким. Перед тем как выйти со своими акциями на биржу, компании для осуществления *IPO* необходимо иметь хорошую историю бизнеса (в части структуры активов и корпоративного управления) и прозрачную отчетность за несколько лет. Затем компания подписывает контракт со своим андеррайтером (андеррайтерами), который в конечном счете и определяет параметры предстоящего *IPO* (сколько акций будет выпущено и по какой цене), чтобы привлечь как можно больше институциональных инвесторов.

Рынок *ICO* породил так называемый утилитарный токен (*utility token*), предлагающий его владельцу доступ к потенциальному продукту или услугам. Но данные токены не дают инвесторам прав владения ценными бумагами или доли владения в компании или проекте³⁴. Как только *ICO* запускается, компания может получать средства от инвесторов, в основном в форме криптовалют, таких как биткоин или эфириум. При получении этих средств компании (через смарт-контракты) выдают инвестору соответствующее количество токенов и переводят полученные средства на кошелек эмитента. Эти транзакции проверяются майнерами и сохраняются в блокчейне. Затем токены могут быть размещены на криптобиржах, таких как *Binance*, *Coinbase Exchange* или *Huobi Global*, для торговли держателями токенов. Но тут могут возникнуть риски, связанные с отсутствием лица, предоставляющего гарантии, не несущего ответственность в отношении этих токенов³⁵.

Финансирование через *STO* имеет существенные преимущества и структурные различия по сравнению с традиционными формами сбора денежных средств. В отличие от традиционных форм финансирования, *STO* не обязательно требует финансового посредника, а скорее может быть спроектирована как одноранговый механизм (*peer-to-peer mechanism*), в рамках которого владелец токена получает право на долю в компании или договорные претензии на активы, выраженные в форме ценной бумаги³⁶. Например, токены в форме *STO* могут представлять собой ряд неликвидных активов, включая акции компаний, недвижимость или права интеллектуальной собственности. Это привело к тому, что начиная с 2019 г. предложения токенов безопасности (*STOs*) приобрели популярность во многих юрисдикциях (Lambert et al., 2021). Но в то же время до сих пор не совсем ясно, выживет ли данная форма финансирования, если на этот рынок *STOs* придут такие игроки, как фондовые биржи и крупные инвестиционные банки.

³⁴ *Mastercoin* была первой организацией, которая в 2014 г. провела *ICO*, собрав около 5,5 млн долл. США, а *Ethereum* стала второй компанией, собрав в том же году 18 млн долл. США. См. Griffith, E. (2017). Why startups are trading IPOs for ICOS. *Fortune Magazine*, <http://fortune.com/2017/05/05/ico-initial-coin-offering/>.

³⁵ Правовые аспекты криптовалюты и ICO. (2017). Москва: Адвокатское бюро «Линия права».

³⁶ *Tokenization of Assets. Decentralized Finance (DeFi)*. Vol. 1. Spot on: Fundraising & StableCoins in Switzerland (pp. 30–34). https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_ch/topics/blockchain/ey-tokenization-of-assets-brochure-final.pdf

6. Проблемы токенизации активов

Все проблемы токенизации активов связаны с трилеммой блокчейна, постулированной одним из основателей *Ethereum* Виталиком Бутериным (Buterin, 2014). Она гласит, что из трех основных свойств – децентрализации, безопасности и масштабируемости – блокчейн может совместить, реализовать только два. Идеи трилеммы блокчейна были заимствованы из теории *CAP*³⁷, которую в 90-х гг. прошлого века разработал Эрик Брюэр. Данные свойства блокчейна реализуются в одноранговой сети распределенных реестров посредством консенсусных алгоритмов, криптографии и хеш-функции (Correia, 2019; Zhang et al., 2019).

При наличии большого количества узлов (нод пользователей), задействованных в одноранговой сети, такую сеть взломать практически невозможно. Так, при текущей рыночной капитализации *Cosmos Hub* и *Polkadot* злоумышленнику потребуется мобилизовать примерно 1,5 и 3,25 млрд долл. США соответственно, чтобы повредить соответствующие экосистемы или *XCMP* в ходе атаки 51 % (Belchior et al., 2023, p. 9). Но в то же время большее количество узлов требует и значительно большего периода времени на установление консенсуса между всеми узлами распределенной сети.

Иначе говоря, невозможно одновременно достичь совместимости между тремя базовыми свойствами блокчейна. Например, блокчейны могут гарантировать высокую децентрализацию и безопасность, но не способны обеспечить высокую масштабируемость. Однако современные наработки в этой области свидетельствуют о том, что данная трилемма в настоящее время становится не столько неразрешимой проблемой, сколько набором возможных компромиссов, которые могут сохранять все эти три свойства, но на разных уровнях. И этому способствуют недавние исследования в области совместимости различных типов блокчейнов (*cross-chain interoperability*), объясняющих способы повышения масштабируемости транзакций в распределенной сети блокчейнов.

Чтобы соединить, совместить блокчейны, нам необходимо использовать набор методов, таких как сайдчейны (*sidechains*) (Back et al., 2014; Singh et al., 2020), роллапы (*rollups*) (Thibault et al., 2022) или механизмы временных меток (*timestamping mechanisms*) (Tas et al., 2023), позволяющих обмениваться данными и передавать активы между реестрами разных блокчейнов (Belchior et al., 2021). В то же время данные методы не совсем совершенны, они еще уязвимы (Сидоренко, 2023а; 2023b), о чем свидетельствуют потери на сумму более 2,5 млрд долл. США, возникшие в блокчейн-мостах (более 110 мостов) самых популярных кроссчейн-приложений *DeFi* (Belchior et al., 2023а; Lee et al., 2022). Для минимизации потерь в процессе передачи данных и активов между разными блокчейнами был предложен компромиссный вариант – омникан-приложения (*omnichain applications*), известные как децентрализованные приложения с несколькими цепочками (Belchior et al., 2023b).

По мнению ряда экспертов, хорошей альтернативой кроссчейн-совместимости может выступать мультичейн-совместимость (*multi-chain interoperability*)³⁸. Но данная точка зрения в настоящее время принимается не всеми разработчиками³⁹. Так, с одной стороны, можно согласиться с тем, что мультичейн-совместимость способна снижать вектор атаки на совместимые приложения блокчейна, но, с другой стороны, верно и обратное – невозможно создать единый (общий) блокчейн, который бы эффективно управлял всеми приложениями *DeFi* одновременно. Поэтому неудивительно, что одни разработчики отдают приоритет масштабируемости, жертвуя при этом децентрализацией, другие больше фокусируются на конфиденциальности (Androulaki et al., 2018), третьи ориентируются на отдельные приложения, больше связанные с безопасностью сети и транзакций (Kwon & Buchman, 2019; Wood, 2016).

Мы считаем, что кроссчейн-совместимость (*cross-chain interoperability*) является наилучшим вариантом совместимости блокчейнов, обеспечивающих рост эффективности процесса токенизации активов. Этот факт подтверждается как уже существующей академической литературой, появившейся за последнее десятилетие

³⁷ Теорема *CAP* свидетельствует, что для децентрализованной базы данных выполняются только два из трех основных свойств: согласованности, доступности и устойчивости к делению (Gilbert & Lynch, 2012).

³⁸ *Multi-chain interoperability* – это взаимосвязь между цепочками внутри блокчейна, механизм которого позволяет взаимодействовать блокам в цепочке блокчейна через якорь доверия, реализованный в блокчейн-протоколе (Belchior et al., 2021).

³⁹ Buterin, V. (2022). Vitalik.eth on Twitter, arguments for a multi-chain future. <https://twitter.com/VitalikButerin/status/1479501366192132099> (Twitter – социальная сеть, заблокированная на территории Российской Федерации за распространение незаконной информации).

(Belchior et al., 2021), так и самими наработками криптосферы⁴⁰, называющих функциональную кроссчейн-совместимость ключом к массовому внедрению блокчейнов в процессы токенизации активов (Belchior et al., 2021; CoinTelegraph, 2023; Pillai et al., 2022). В качестве примера кроссчейн-совместимости блокчейнов в процессе токенизации активов можно назвать такие проекты, как проект *Genesis*⁴¹, проект *Guardian*⁴², проект *JP Morgan*⁴³, проект *Expobank*⁴⁴, проект *HSBC*⁴⁵ и ряд других.

7. Факторы роста эффективности токенизации активов

Повышение эффективности токенизации активов связано с решением проблем функциональной совместимости, уже систематизированных в отдельных работах (Belchior et al., 2021; 2023b). В то же время в научной сфере до сих пор отсутствует теория функциональной совместимости, что является одной из фундаментальных проблем, сдерживающих обоснование и рост эффективности токенизации активов. Именно наличие данной теории способно, по мнению ряда специалистов, обеспечить основу для разработки различных методов, режимов и связанных с ними рабочих процессов, обеспечивающих рост эффективности токенизации активов (Belchior et al., 2023). По состоянию на июнь 2023 г. наиболее важными, по нашему мнению, факторами роста эффективности токенизации активов могут стать анонимность и конфиденциальность, безопасность и сохранность прав на токенизированные активы.

7.1. Анонимность и конфиденциальность

Поскольку лежащая в основе токенизации активов технология блокчейн является прозрачной, это позволяет инвесторам видеть всю историю движения активов и принимать в связи с этой прозрачностью свои бизнес-решения. Но при этом принято считать, что данная прозрачность движения активов должна обязательно сопровождаться анонимностью передаваемых транзакций и в контексте *cross-chain interoperability* (Yin et al., 2023). Иначе говоря, анонимная передача (или обмен) активов должна скрывать личности пользователей, участвующих в транзакции. Конфиденциальность же не позволяет передавать информацию о пользователях третьим сторонам.

Исследователи и практики, продвигающие *cross-chain interoperability*, проделали немалую работу, особенно в области передачи активов (между блокчейнами с повышенной конфиденциальностью в качестве источника и публичными блокчейнами в качестве цели (Sanchez et al., 2022), используя, например, технологии с нулевым разглашением доказательств). Несмотря на то, что данные работы находятся еще в самом начале пути, уже становится ясно, что в сценариях, где задействован хотя бы один блокчейн с повышенной конфиденциальностью (такие как *Hyperledger Fabric*, *ZCash* или *Monero*), необходимо сохранять и гарантировать определенный уровень анонимности.

И все же конфиденциальность при передаче данных о клиентах в условиях анонимности изучена в научной литературе недостаточно, лишь частично. Поэтому некоторые авторы стали работать над созданием концепции самодостаточной идентичности (*self-sovereign identity*) для облегчения кроссчейн-совместимости между блокчейнами (Belchior et al., 2020). Однако это может потребовать аутентифицировать запросы о клиентах с использованием четкого контроля за их данными, что приведет к внедрению стандарта KYC («Знай своего клиента»), а значит, к снижению уровня конфиденциальности клиентов, участвующих в транзакционных

⁴⁰ Coindesk. (2023). Cross-chain articles – coindesk. <https://www.coindesk.com/tag/cross-chain/>; The Block (2023). Theblocknews-cross-chain. <https://www.theblock.co/search?query=cross%20chain>

⁴¹ В 2021 г. Валютное управление Гонконга (HKMA) и центр инноваций Банка международных расчетов в Гонконге (BIS Innovation Hub's Hong Kong center) провели тестирование по выпуску токенизированных зеленых облигаций.

⁴² Этот проект связан с инициативой Валютного управления Сингапура (The Monetary Authority of Singapore) и финансового сектора страны, направленный на оценку жизнеспособности приложений токенизации активов и децентрализованного финансирования (DeFi).

⁴³ В 2020 г. JP Morgan запустил первую блокчейн-платформу Onyx, предназначенную для облегчения передачи цифровых активов, информации и ценностей. Было разработано приложение «Токенизированная сеть обеспечения» (TCN), позволяющая инвесторам закладывать активы в качестве залога.

⁴⁴ Expobank выпустил первое в мире токенизированное предложение бриллиантов, допустив к этому рынку мелких инвесторов.

⁴⁵ HSBC представил свою платформу токенизации золота, которая предоставляет клиентам токенизированное владение физическим золотом, надежно хранящимся в хранилищах банка.

сделках в одноранговой сети. И, хотя первые шаги в кроссчейн-совместимости между блокчейнами уже сделаны, решения по обеспечению конфиденциальности (передаче данных), обмену активами с сохранением конфиденциальности и передаче активов с сохранением конфиденциальности еще практически не реализованы. Более того, отсутствуют серьезные исследования, позволяющие провести работу по совместимости анонимности и конфиденциальности в условиях токенизации активов (Belchior et al., 2023c, p. 10).

7.2. Мониторинг безопасности

В современном мире безопасность имеет важное значение. Технология блокчейн, лежащая в основе токенизации активов, обеспечивает неизменяемую запись о собственности (правах владения), исключая вероятность ошибок и мошенничества. Процессы шифрования и проверки транзакций обеспечивают целостность и безопасность частных инвестиций. Более того, мониторинг мостов и сложных, а иногда и хрупких связей между блокчейн-технологиями быстро становятся труднореализуемыми, поскольку системы, с которыми приходится иметь дело, неоднородны и децентрализованы, а системы, построенные на их основе (например, децентрализованные приложения), могут иметь сколь угодно сложную бизнес-логику (Belchior et al., 2023a).

Представьте себе простой случай: ваше приложение на блокчейне *A* зависит от консенсуса блокчейна *B*. Что произойдет, если блокчейн *B* подвергнется кроссчейн-атаке (Lee et al., 2022) (например, 51 %)? Скорее всего, произойдет то, что случилось с блокчейном *Terra*, подвергнутым атаке, что негативно повлияло на связанные с ним через мост *Osmosis* блокчейны *Cosmos* и *Ethereum*. В результате краха блокчейна *Terra* хакеры дестабилизировали стейблкоин, размещенный на платформе *Terra*. Эта дестабилизация вызвала каскадную ликвидацию монет на крипторынке⁴⁶ (Economy, and Business, 2022). В результате операторы мостов вынуждены были вручную отключать мосты, что приводило к серьезным экономическим потерям. Поэтому своевременный мониторинг безопасности операций мог бы предотвратить столь трагический исход и помочь смягчить возникшие потери, показанные на примере блокчейна *Terra*. Поэтому решения, основанные на моделировании по спецификациям (Belchior et al., 2023a) или больших кроссчейновых моделях (Gai et al., 2023), могут стать интересными направлениями для будущих исследований в сфере совместимости блокчейнов.

7.3. Сохранность прав на токенизированные активы

Сохранность прав на токенизированные активы подтверждается для пользователя его «закрытым ключом»⁴⁷ (*private key*), который способен предотвращать кражу и несанкционированный доступ к этим активам. В условиях цифровых платформ кардинально меняется сама роль кастодианта, которая в условиях токенизации активов будет заключаться в безопасном хранении и управлении ключами клиентов. Но в настоящее время лишь немногие квалифицированные хранители имеют лицензию от регуляторов на хранение токенов институциональных инвесторов. И основная причина – отсутствие единой общепринятой стандартизации требований к лицензиям кастодиантных организаций, обеспечивающих хранение и передачу токенизированных активов между кастодиантами и институциональными инвесторами.

В настоящее время лишь нескольким компаниям удалось получить одобрение регулирующих органов, в том числе криптовалютным биржам (*Coinbase*, *Gemini* и *BitGo*) и крупнейшим банковским корпорациям (*HSBC* и *Fidelity International*), являющимся в настоящее время квалифицированными хранителями токенизированных активов институциональных инвесторов во всем мире. Например, банковская корпорация *HSBC* в ноябре 2019 г. запустила кастодиальную блокчейн-платформу *Digital Vault* для оцифровки записей транзакций по хранению и передаче активов частных клиентов, а *Fidelity International*, базирующаяся в США, организовала платформу *Fidelity Digital Asset Services* с целью защиты, торговли и поддержки цифровых активов⁴⁸.

Все это свидетельствует о том, что развитие решений по хранению токенизированных активов, а также стандартизация лицензионных требований к кастодиантам в перспективе будет иметь решающее значение

⁴⁶ Sánchez, Á. (2022, May 12). Luna crypto crash wipes out savings of thousands of investors, sparking fears for sector. El País. <https://english.elpais.com/economy-and-business/2022-05-12/luna-crypto-crash-wipes-out-savings-of-thousands-of-investors-sparking-fears-for-sector.html>

⁴⁷ Закрытый ключ – это фрагмент кода, который известен только владельцу и дает ему возможность подписывать транзакцию.

⁴⁸ The 10x potential of tokenization. (2020, August). HSBC, 8. <https://www.gbm.hsbc.com/insights/securities-services/distributed-ledger-technology>

для стимулирования роста токенизированных активов в мировой экономике. Более того, ряд финансовых организаций-кастодиантов могут рассматривать возможность выполнения роли назначенного депозитария, чтобы обеспечить лучшую совместимость токенизированных активов с реальными активами.

Заключение

В настоящее время токенизация активов становится новым мейнстримом современной экономики. Она позволяет привлечь в экономику дополнительную ликвидность, обеспечить большую прозрачность в отношении прав на реальные активы, повысить эффективность транзакций за счет снижения операционных расходов, а также получить доступ к экосистеме *DeFi*, позволяющей расширить потенциал финансового рынка за счет сочетания дробления и компонуемости токенизированных активов.

Токенизация активов – это процесс трансформации учета и управления активами, при котором каждый актив представляется в виде программируемого цифрового токена. При этом программируемые токены могут представлять собой небольшую часть (долю) любого реального актива. Это позволяет повысить капитализацию рынка за счет токенизации долевого владения ликвидными и неликвидными активами, например, такими, как недвижимость, ценные бумаги, интеллектуальная собственность или произведения искусства, традиционно требующие более высоких капитальных вложений.

Токенизация, предлагая новые источники ликвидности, может изменить динамику финансового рынка. Более широкое внедрение токенизации может принести системные преимущества, такие как более надежная, открытая и эффективная инфраструктура финансового рынка. Однако это прежде всего представляет собой проблему координации, совместимости блокчейнов, протоколов и приложений *DeFi*. Без эффективной координации этих процессов токенизация может еще больше фрагментировать рынок активов как технически, так и финансово за счет добавления в его структуру новых цифровых платформ вместо их объединения.

Все проблемы токенизации активов связаны с трилеммой блокчейна, постулирующей, что из трех основных свойств – децентрализации, безопасности и масштабируемости – блокчейн может совместить, реализовать только два. Однако современные наработки в этой области свидетельствуют о том, что данная трилемма в настоящее время становится не столько неразрешимой проблемой, сколько набором возможных компромиссов, которые могут сохранять все эти три свойства, но на разных уровнях. И этому способствуют недавние исследования в области совместимости различных типов блокчейнов (*cross-chain interoperability*), объясняющие способы повышения масштабируемости транзакций в распределенной сети блокчейнов.

Повышение эффективности токенизации активов связано с решением проблем функциональной совместимости. В научной сфере до сих пор отсутствует теория функциональной совместимости, что является одной из фундаментальных проблем, сдерживающей обоснование и рост эффективности токенизации активов. Данная теория должна строиться на совместимости таких факторов токенизации, как анонимность и конфиденциальность, безопасность и сохранность прав на токенизированные активы. Это позволит создать основу для разработки различных методов, режимов и связанных с ними рабочих процессов, обеспечивающих рост эффективности токенизации активов в любой экономике.

Список литературы / References

- Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, Ch., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, Ch., Vukolić, M., Weed Cocco, Sh., & Yellick, J. (2018). Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains. In *Proceedings of the Thirteenth EuroSys conference* (pp. 1–15). <https://arxiv.org/abs/1801.10228>
- Andryushin, S. A. (2019). *Money-credit systems: from sources to cryptocurrencies*. Moscow: Sam Poligrafist LLC. (In Russ.).
- Auer, R., Monnet, C., & Shin, H. S. (2021, January). Permissioned distributed ledgers and the governance of money. *BIS Working Papers*, 924.
- Aldasoro, I., Doerr, S., Gambacorta, L., Garratt, R., & Wilkens, P. K. (2023, April 11). The tokenisation continuum. *BIS Bulletin*, 72.
- Back, A., Corallo, M., Dashjr, L., Friedenbach, M., Maxwell, G., Miller, A., Poelstra, A., Timón, J., & Wuille, P. (2014). *Enabling blockchain innovations with pegged sidechains*. <https://blockstream.com/sidechains.pdf>

- Bartoletti, M., Hsin-yu Chiang, J., & Lluch-Lafuente, A. (2023). Towards a Theory of Decentralized Finance. In M. Bernhard et al. *Financial Cryptography and Data Security. FC 2021 International Workshops. FC 2021. Lecture Notes in Computer Science* (vol. 12676). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63958-0_20
- Baum, C., David, B., & Frederiksen, T. (2021). P2DEX: Privacy-Preserving Decentralized Cryptocurrency Exchange. *Cryptology ePrint Archive, Report 2021/283*. <https://eprint.iacr.org/2021/283>
- Bartoletti, M., Hsin-yu Chiang, J., & Lluch-Lafuente, A. (2021a). SoK: Lending pools in decentralized finance. *5th Workshop on Trusted Smart Contracts*. <https://arxiv.org/abs/2012.13230>
- Bartoletti M., Hsin-yu Chiang J., & Lluch-Lafuente A. (2021b). A theory of automated market makers in defi. *arXiv preprint arXiv:2102.11350*. <http://arxiv.org/abs/2102.11350>
- Belchior, R., Süßenguth, J., Feng, Q., Hardjono, T., Vasconcelos, A., & Correia, M. (2023, October). A Brief History of Blockchain Interoperability. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23418677>
- Belchior, R., Riley, L., Hardjono, T., Vasconcelos, A., & Correia, M. (2023b). Do you need a distributed ledger technology interoperability solution? *Distributed Ledger Technologies: Research and Practice*, 2(1), Art. 1, 1–37. <https://doi.org/10.1145/3564532>
- Belchior, R., Vasconcelos, A., Guerreiro, S., & Correia, M. (2021). A survey on blockchain interoperability: Past, present, and future trends. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(8), Art. 168, 1–41. <https://doi.org/10.1145/3471140>
- Belchior, R., Somogyvari, P., Pfannschmid, J., Vasconcelos, A., & Correia, M. (2023a). Hephaestus: Modelling, analysis, and performance evaluation of cross-chain transactions. *TechRxiv preprint*. https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Hephaestus_Modelling_Analysis_and_Performance_Evaluation_of_Cross-Chain_Transactions/20718058
- Belchior, R., Putz, B., Pernul, G., Correia, M., Vasconcelos, A., Somogyvari, P., & Guerreiro, S. (2020). SSIBAC: self-sovereign identity based access control. *IEEE 19th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*. <https://doi.org/10.1109/trustcom50675.2020.00264>
- Belchior, R., Süßenguth, J., Feng, Q., Hardjono, T., Vasconcelos, A., & Correia, M. (2023c). A Brief History of Blockchain Interoperability. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23418677>
- Belchior, R., Mihaiu, Iu., Scuri, S., et al. (2023, October 12). A Framework to Evaluate Blockchain Interoperability Solutions. *TechRxiv*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17093039.v4>
- Buterin, V. (2014). A next-generation smart contract and decentralized application platform. *Ethereum White Paper*. https://blockchainlab.com/pdf/Ethereum_white_paper-a_next_generation_smart_contract_and_decentralized_application_platform-vitalik-buterin.pdf
- Carapella, F., Chuan, G., Gerszten, J., Hunter, Ch., & Swem, N. (2023, August). Tokenization: Overview and Financial Stability Implications. *Finance and Economics Discussion Series*. 2023-060.
- Clarke, A. (2022, August 28). Why interoperability is the key to blockchain technology's mass adoption. *Cointelegraph*. <https://cointelegraph.com/news/why-interoperability-is-the-key-to-blockchain-technology-s-mass-adoption>
- Correia, M. (2019). From Byzantine Consensus to Blockchain Consensus. In *Essentials of Blockchain Technology* (Chapter 3). CRC Press. <https://www.dpss.inesc-id.pt/~mpc/pubs/Chapter-From-Byzantine-Consensus-to-Blockchain-Consensus.pdf>
- Daian, P., Goldfeder, S., Kell, T., Li, Y., Zhao, X., Bentov, I., Breidenbach, L., & Juels, A. (2020). Flash boys 2.0: Frontrunning in decentralized exchanges, miner extractable value, and consensus instability. In *2020 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Francisco, CA, USA, 2020* (pp. 910–927). <https://doi.org/10.1109/SP40000.2020.00040>
- European Banking Authority. (2014). *EBA Opinion on 'virtual currencies'* (S. 1–46). <https://eba.europa.eu/documents/10180/657547/EBA-Op-2014-08+Opinion+on+Virtual+Currencies.pdf>
- Gai, Y., Zhou, L., Qin, K., Song, D., & Gervais, A. (2023, April). Blockchain large language models. *IEEE Access. arXivpreprintarXiv*. <https://arxiv.org/pdf/2304.12749.pdf>
- Gilbert, S., & Lynch, N. (2012). Perspectives on the CAP theorem. *Computer*, 45(2), 30–36. <https://doi.org/10.1109/mc.2011.389>
- Giungato, P., Rana, R. L., Tricase, C., & Foltynowicz, Z. (2021). Standards for the New Economy. In R. Pamfilie, V. Dinu, L. Tăchiciu, D. Pleşea, C. Vasiliu (Eds.). *7th BASIQ International Conference on New Trends in Sustainable Business and Consumption*. Foggia, Italy, 3–5 June (pp. 441–447). Bucharest: ASE. <https://doi.org/10.24818/basiq/2021/07/057>
- Kwon, J., & Buchman, E. (2019). Cosmos white paper. A Network. Distrib. Ledgers. <https://www.mdpi.com/2073-431X/10/7/89>
- Lacity, M. C., & Treiblmaier, H. (Eds.). (2022). *Blockchains and the Token Economy. Theory and Practice*. Palgrave Macmillan. Springer Nature Switzerland AG.
- Lambert, T., Liebau, D., & Roosenboom, P. (2021). Security token offerings. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3634626>
- Lee, S.-S., Murashkin, A., Derka, M., & Gorzny, J. (2022, October 28). SoK: Not quite water under the bridge: Review of cross-chain bridge hacks. October. *arXiv:2210.16209v1*. <https://arxiv.org/pdf/2210.16209.pdf>
- Leung, V., Wong, J., Ying, A., & Wan, W. (2023, November). An Assessment on the Benefits of Bond Tokenisation. *Hong Kong Monetary Authority*. <https://www.hkma.gov.hk/media/eng/publication-and-research/research/research-memorandums/2023/RM04-2023.pdf>
- Pillai, B., Biswas, K., Hóu, Z., & Muthukumarasamy, V. (2022). Cross-blockchain technology: integration framework and security assumptions. *IEEE Access*, 10(1). <https://doi.org/10.1109/access.2022.3167172>
- Sanchez, A., Steward, A., & Shirazi, F. (2022). Bridging sapling: Private cross-chain transfers. *IEEE Crosschain Workshop (ICBC-CROSS)* (pp. 1–9). <https://arxiv.org/pdf/2204.10611.pdf>

- Schwab, K. (2019). The Global Competitiveness Report. World Economic Forum. https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf
- Sidorenko, E. L. (2023). Defi-crime: condition, trends and criminological models. *Russian Journal of Economics and Law*, 17(2), 327–341. (In Russ.). <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.2.327-341>.
- Sidorenko, E. L. Legalization of criminal income using DeFi: typical schemes and risk indicators. *Russian Journal of Economics and Law*, 17(4), 822–836. (In Russ.). <https://doi.org/10.21202/2782-2923.2023.4.822-836>.
- Singh, A., Click, K., Parizi, R. M., Zhang, Q., Dehghantanha, A., & Choo, K.-K. R. (2020). Sidechain technologies in blockchain networks: An examination and state-of-the-art review. *Journal of Network and Computer Applications*, 149(C). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.jnca.2019.102471>
- Tas, E. N., Han, R., Tse, D., Yu, F., & Nazirkhanova, K. (2023, May 13). Interchain timestamping for mesh security. *arXiv:2305.07830v1*. <https://arxiv.org/pdf/2305.07830.pdf>
- Thibault, L. T., Sarry, T., & Hafid, A. S. (2022, August). Blockchain scaling using rollups: A comprehensive survey. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3200051>
- Werner, S. M., Perez, D., Gudgeon, L., Klages-Mundt, A., Harz, D., & Knottenbelt, W. J. (2021). *Sok: Decentralized finance (DeFi)*. <https://arxiv.org/abs/2101.08778>
- Wood, G. (2016). Polkadot: Vision for a heterogeneous multi-chain framework. Draft 1. *White paper*. <https://assets.polkadot.network/Polkadot-whitepaper.pdf>
- Yin, R., Yan, Z., Liang, X., Xie, H., & Wan, Z. (2023). A survey on privacy preservation techniques for blockchain interoperability. *Journal of Systems Architecture*, 140(C). <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2023.102892>
- Zhang, R., Xue, R., & Liu, L. (2019). Security and privacy on blockchain. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(3), Art. 51, 1–34. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3316481>

Конфликт интересов / Conflict of Interest

Автор является членом редколлегии журнала *Russian Journal of Economics and Law*. Статья прошла рецензирование на общих основаниях / The author is a member of the Editorial Board of the *Russian Journal of Economics and Law*. The article has been reviewed on the usual terms

История статьи / Article history

Дата поступления / Received 25.01.2023

Дата одобрения после рецензирования / Date of approval after reviewing 27.02.2024

Дата принятия в печать / Accepted 27.02.2024