

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий

**Разработка модели криптовалюты на основе алгоритма
консенсуса реализующего метод доказательства доли
владения**

Агапов Г.Д.

Научный руководитель: Чивилихин Д.С.

Санкт-Петербург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	6
1.1. Блокчейн	6
1.1.1. Применение структуры Блокчейн	7
1.2. Консенсус-алгоритмы в блокчейн-системах	8
1.2.1. Метод доказательства выполнения работы	9
1.2.2. Метод доказательства доли владения	9
1.3. Криптовалюты	9
1.3.1. Функциональность криптовалюты	10
1.3.2. Спецификации существующих систем	12
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	15
2.1. Задача построения модели криптовалюты	15
2.1.1. Критерии для построенной модели	16
2.2. Существующие попытки построения модели криптова- люты	17
2.2.1. Фреймворк Scorex	18
2.2.2. Модели криптовалют с PoS	18
2.3. Цели настоящей работы	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	21

ВВЕДЕНИЕ

TODO Введение

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В настоящей главе проводится краткий обзор предметной области.

Вводится понятие блокчейна, рассматриваются консенсус-алгоритмы, используемые в блокчейн-системах. Вводится понятие криптовалюты, рассматриваются реализованные системы, реализующие функционал криптовалюты, спецификации к ним.

1.1. Блокчейн

Опр. 1.1. Блокчейн (в переводе с английского ”цепочка блоков”) – структура данных, представляющая собой последовательный непрерывно расширяющийся список записей, связанных между собой по принципу односвязного списка, с использованием криптографически стойкой хэш-функции для установления связей.

Запись в блокчейне вместе с её связью принято называть блоком. В реализациях структуры блокчейн, как правило, каждый связью является ссылка на предыдущий блок, где ссылкой является значение криптографически стойкой хэш-функции, примененной к предыдущему блоку.

$$\begin{aligned} Blockchain_{\langle H, Data \rangle} &= \{ \langle origin, blocks \rangle \mid origin \in Data, \\ &blocks \in List_{\langle Data, Value_H \rangle}, \\ &\langle index, block \equiv \langle data, value_H \rangle \rangle \in blocks \\ &\implies \begin{cases} value_H = H(origin), & \text{if } index = 1 \\ value_H = H(blocks[index - 1]), & \text{otherwise} \end{cases} \\ &\} \end{aligned} \tag{1.1}$$

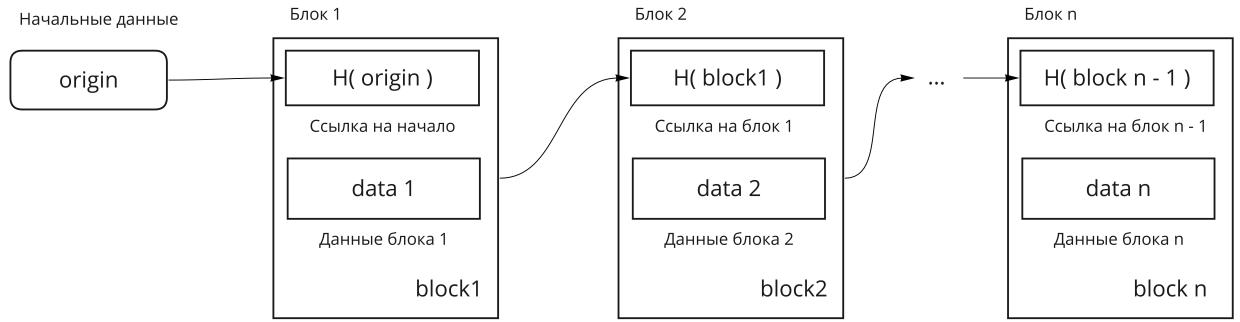


Рис. 1.1 — Диаграмма структуры Блокчейн

Построенная таким образом структура данных имеет интересное свойство по сравнению с односвязным списком:

$$\begin{aligned}
 & \forall i, n, x_0, \dots, x_n, x'_i \\
 & \langle x_0, [\text{block}_1 \equiv \langle x_1, H(x_0) \rangle, \dots, \\
 & \quad \text{block}_i \equiv \langle x_i, H(\text{block}_{i-1}) \rangle, \dots, \\
 & \quad \text{block}_n \equiv \langle x_n, H(\text{block}_{n-1}) \rangle] \rangle \in \text{Blockchain}_{\langle H, \text{Data} \rangle}, \\
 & i \neq n, x_i \neq x'_i \implies
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$\begin{aligned}
 & \langle x_0, [\text{block}_1 \equiv \langle x_1, H(x_0) \rangle, \dots, \\
 & \quad \text{block}'_i \equiv \langle x'_i, H(\text{block}_{i-1}) \rangle, \dots, \\
 & \quad \text{block}_{i+1} \equiv \langle x_{i+1}, H(\text{block}_i) \rangle, \dots, \\
 & \quad \text{block}_n \equiv \langle x_n, H(\text{block}_{n-1}) \rangle] \rangle \notin \text{Blockchain}_{\langle H, \text{Data} \rangle},
 \end{aligned}$$

Иными словами, невозможно поменять содержание блока, не меняя при этом последующих блоков в структуре. Данное свойство опирается на предположении о стойкости криптографической функции H , в частности: для данного $h \in \text{Value}_h$ практически невозможно подобрать x такой что $H(x) = h$.

1.1.1. Применение структуры Блокчейн

Гораздо чаще термин “Блокчейн” применяется не к структуре как к таковой, а к классу систем, использующих её как одну из основных компонент. Большая часть известных систем, использующих эту структуру, представляют из себя распределенные базы данных, как правило специализированные под конкретные области применения. Примеры таких систем:

- Криптовалюты (распределенная база данных, предназначенная для хранения информации о счетах, проведения транзакций над ними).
 - Примеры: Bitcoin [1], NXT [2], Cardano [3].
- Системы для распределенных вычислений с использованием т.н. смарт-контрактов.
 - Как частный случай распределенных вычислений, используются для реализации финансовых контрактов.
 - Примеры: Ethereum [4], NEO [5].
- Распределенные базы данных.
 - Как правило, реализуются для хранения данных, относящихся к конкретной области применения
 - Примеры: Namecoin [6] (альтернатива системе DNS), Disciplina [7] (система для хранения и обмена данных об академической успеваемости)

Структура Блокчейн нашла такое широкое применение в построении распределенных баз данных в первую очередь в следствии свойства 1.2. Если участники сети достигли консенсуса (возможно, в нестрогом смысле) относительно блока b , то они автоматически находятся в согласии со всеми блоками, предшествующим b в структуре.

1.2. Консенсус-алгоритмы в блокчейн-системах

Большинство алгоритмов консенсуса, разработанных для блокчейн-систем являются алгоритмами для достижения в системе согласованности в конечном счёте (англ. *eventual consistency*) или эвентуального консенсуса. В отличие от классических консенсус алгоритмов, таких как Paxos [8], Raft [9], от алгоритма консенсуса не требуется достижение полного консенсуса в системе, но полагается достаточным достижение частичного консенсуса, переходящего в полный с вероятностью увеличивающейся со временем с момента достижения согласия о некотором значении большинством узлов сети.

Первопроходцем среди распределенных систем, использующих структуру Блокчейн по праву считается криптовалюта Bitcoin [1]. В статье “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System” за авторством Satoshi Nakamoto [10],

описывающей концепцию децентрализованной системы электронных денег, предлагается использование метода доказательства выполнения работы (англ. proof of work) для построения алгоритма эвентуального консенсуса. В оригинальной статье предлагается алгоритм эвентуального консенсуса без подробного анализа, в последующих работах других авторов, в частности “The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications” [11], доказано что предложенный алгоритм (с небольшими модификациями) является толерантным к атакам, если как минимум $2/3$ вычислительной мощности сети находится в управлении честных участников.

Метод доказательства выполнения работы был в дальнейшем применен для построения алгоритмов эвентуального консенсуса для систем Ethereum [4], ZCash [12], IOTA [13], равно как и множества других блокчейн-систем.

Другим популярным методом для построения консенсус-алгоритмов в блокчейн-системах является метод доказательства доли владения (англ. proof of stake), нашедший своё применение в построении алгоритмов эвентуального консенсуса Ouroboros [14], Snow White [15], алгоритмов для систем NXT [2], NEO [5]. Метод может быть также применен в построении алгоритмов полного консенсуса, в частности в алгоритме Algorand [16], также возможность применения метода доказательства доли владения для разработки распределенных систем упомянута авторами алгоритма Honey Badger BFT [17].

1.2.1. Метод доказательства выполнения работы

TODO описания принципа PoW

1.2.2. Метод доказательства доли владения

TODO описания принципа PoS

1.3. Криптовалюты

Опр. 1.2. Криптовалюта – собирательный термин для систем электронных денег, использующих методы криптографии для установления собственности средств при проведении транзакций.

В определении, данном, выше, заложен следующий аспект большинства (если не всех) систем, относимых к криптовалютам: использование асинхронной криптографии. Каждая денежная единица в системе ассоциирована с некоторым адресом $Addr = CreateAddr (PubKey)$, построенном на основе публичного ключа $PubKey$. Для проведения трансфера средств с одного адреса на другой (транзакции) требуется предоставить подпись информации о транзакции, сделанной секретным ключом $Secretkey$, соответствующим публичному ключу $PubKey$.

1.3.1. Функциональность криптовалюты

Базовой функциональностью криптовалюты, является отправление транзакций между различными участниками сети: участник S имеет возможность послать средства на сумму c участнику T при условии что ему известен адрес участника T и на его адресах содержится средств на сумму, не меньшую c . Однако, уже в первой криптовалюте, нашедшей широкое распространение, Bitcoin [1], создателями было реализовано множество дополнительных функциональностей, в частности:

- Поддержка комиссий за проведение транзакций
- Поддержка скриптовых транзакций
- Поддержка транзакций типа M из N
- Поддержка децентрализованной пириноговой сети

Комиссии за проведения транзакций является важным механизмом для противодействия атакам отказа в доступе, равно как и механизмом поощрения участников, поддерживающих сеть (выпускающих блоки).

Поддержка скриптовых транзакций представляет собой возможность создания адреса, правила валидации права владения которым задаются при помощи предоставляемой пользователем программы (скрипта), запускаемой участниками сети, поддерживающими сеть, при проверки транзакции, использующей средства с данного адреса. Скриптовые транзакции являются очень мощным механизмом, позволяющие реализовать семантику многих составных финансовых операций. Однако, возможности использования скриптовых транзакций для построения финансовых контрактов с помощью скриптового языка в Bitcoin [1] весьма ограничены, т.к. семантика использования скриптовых транзакций не позволяет описать конечный автомат (только ко-

нечный автомат, выполняющий ровно один переход из начального состояния в конечное). Это ограничение было устранено в системе Ethereum [4].

Поддержка транзакций типа M из N является частным случаем финансового контракта. Задача состоит в предоставлении N участникам сети возможности создания адреса A для списания средств с которого требуется взаимодействие как минимум M участников из N , участвовавших в создании адреса. В простейшем случае, адрес A будет представлять из себя конкатенацию публичных ключей N участников и предоставление подписей транзакции M участниками требуется для валидации транзакции. Именно так транзакции типа M из N реализованы в Bitcoin [1], при использовании скриптового языка. Однако возможны и принципиально отличные реализации этого типа транзакций, например с использованием пороговых криптосистем [18].

Большинство криптовалют разрабатываются как открытые децентрализованные пиринговые (Peer-to-peer или P2P) сети, т.е. позволяют любому пользователю сети Интернет стать участником сети. Однако это не является необходимым требованием для создания криптовалюты. Существуют проекты криптовалют с закрытой топологией сети (например, проект Hyperledger [19]), равно как и централизованные (RSCoin [20]). Создателями Bitcoin протоколы для поддержки пиринговой сети были реализованы с нуля. Создатели сети Ethereum взяли за основу своей сети протокол Kademlia [21], внося в него ряд модификаций.

Помимо упомянутых выше функциональностей существуют и другие, поддерживаемые во многих блокчейн-системах:

- Делегация
 - Реализовано во многих криптовалютах, реализующих метод доказательства доли владения, в частности в NEM [22].
- Поддержка обновления протоколов
 - Поддержка “ручного” обновления протоколов (достижения согласия между участниками сети) реализована в большинстве блокчейн-систем посредством, как правило, версионирования форматов блока, протоколов сети и установления процедур коммуникации между командами людей, поддерживающих узлы сети.

- Поддержка полностью автоматизированных обновлений протокола анонсирована для криптовалюты Tezos [23], не поддерживается подавляющим большинством блокчейн-систем.
- Поддержка обновления программного обеспечения участников сети.
- Расширения понятия блокчейна до понятия ациклического графа блоков
 - Реализовано в криптовалюте ИОТА [13].
- Поддержка криптографических протоколов доказательства с нулевым разглашением [24]
 - Реализовано в криптовалюте ZCash [12]

1.3.2. Спецификации существующих систем

Стандартом блокчейн-индустрии является написание технической спецификации, часто форматируемой по типу научной публикации, задача которой состоит в описании основных технических решений системы.

В таблице 1.1 рассмотрены технические спецификации некоторых известных криптовалют с точки зрения детализации, содержания.

Следует заметить что большинство существующих блокчейн-систем не предоставляют должного качества спецификаций, что сужает возможность их анализа с целью рассмотрения их модели. Многие системы являются клонами или несущественными (с точки зрения проблем, рассматриваемых в настоящей работе) модификациями систем, рассмотренных в таблице 1.1. Документы, упомянутые в таблице 1.1 являются одними из лучших, имеющихся в доступе.

Таблица 1.1 — Сравнение документации некоторых криптовалют

Документ	Детализация	Комментарий
Ethereum yellow paper [25]	Высокая	Спецификация консенсус протокола вынесена в отдельную статью. В подробной форме специфицирована логика валидации транзакций, блоков.

Документ	Детализация	Комментарий
Bitcoin developer guide [26]	Средняя	Многokrатно подчеркнuto, что документация не является спецификацией и для спецификации следует обращаться к реализации клиента bitcoind.
EOS.IO Technical White Paper [27]	Низкая	Документ покрывает только основные идеи механизмов, используемые в системе EOS. Для описанных механизмов не даётся подробной спецификации, только высокоуровневый обзор.
Peercoin [28]	Низкая	В документе описывается в неформальной форме консенсус-алгоритм, не приводится никакой математической модели алгоритма, равно как и анализа. В документе не описывается иные компоненты криптовалюты (помимо консенсус-алгоритма).
NEM technical reference [22]	Средняя	Документ является подробной спецификацией технических компонент системы NEM. Спецификация не предлагает модели, описывая компоненты отдельно. Кроме того, логика валидации опускается (т.е. предполагается что её можно извлечь из описаной семантики, что является затруднительным).

Резюме

В данной главе был проведен обзор предметной области блокчейн-систем, криптовалют в частности. Рассмотрены основные подходы к построению консенсус-алгоритмов в них. Приведены результаты анализа спецификаций существующих блокчейн-систем, существующих попыток построения модели блокчейн-систем.

ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей главе формулируется задача построения модели криптовалюты на основе консенсус-алгоритма, использующего метод доказательства доли владения.

Формируются критерии оценки решения задачи, рассматриваются предыдущие попытки её решения. Формулируются цели настоящей работы.

2.1. Задача построения модели криптовалюты

Как было показано в главе 1, на сегодняшний день разработано большое количество блокчейн-систем. Каждая из этих систем реализует различные наборы функциональностей криптовалюты, причем реализации могут сильно отличаться, равно как и способы, с помощью которых функциональности взаимодействуют друг с другом. Создатели очередной блокчейн-системы зачастую вынуждены решать задачу построения системы “с нуля”, опыт коллег может быть использован лишь на уровне заимствования идей, возможности анализа последствий использования этих идей в построенной системе значительно ограничены. В равной степени затруднен и анализ новых идей, желание реализовать которые часто и является отправной точкой для разработки новой системы.

Многие подходы, используемые в блокчейн-системах, опираются на достижения криптографии, использование которых накладывает на разработчика системы ответственность за четкое понимание требований, предъявляемых используемой структурой. То же относится и к более сложным конструкциям, использующим криптографические примитивы как составную часть. Недостаточное понимание требований, предъявляемых используемыми конструкциями при разработке новых систем может легко привести к проблемам с безопасностью, производительностью.

Анализ разработанных систем, равно как и работа над дизайном новых значительно осложняется отсутствием формализации функциональностей криптовалюты, описанием способов их объединения в общую систему. Эти и другие затруднения в разработке дизайна новых блокчейн-систем, равно как и анализе существующих, можно решить посредством формализации понятия криптовалюты, разработки единой абстрактной модели. Функцио-

нальности криптовалюты могут быть описаны как составные компоненты разработанной модели.

Отдельно стоит вопрос разработки блокчейн-систем, использующих метод доказательства доли владения. До публикации работ Ouroboros [14], Snow White [15], Algorand [16] в 2016, не было ни одного доказанно безопасного алгоритма консенсуса (эвентуального или полного), использующего метод доказательства доли владения. Для некоторых существовавших на тот момент алгоритмов были применены атаки [29], против которых по утверждению авторов алгоритмов, алгоритмы должны были быть устойчивыми. В отличие от предшествовавших работ, в Ouroboros (который является первым опубликованным доказанно безопасным алгоритмом, использующим метод доказательства доли владения) авторами строится модель среды, в которой формулируется алгоритм и доказывается его устойчивости при работе в данной среде к известным на момент создания работы атакам.

Однако в вопросе построения блокчейн-систем, на сегодняшний день нет работ, предлагающих формальную модель системы, основанной на консенсус-алгоритме, реализующем метод доказательства доли владения, формулирующих свойства модели и доказывающих их. Требуется заметить, что консенсус-алгоритм является в некотором смысле лишь одной из функциональностей криптовалюты и как следствие этого, даже построив систему на основе доказанно безопасного алгоритма консенсуса, ничего нельзя сказать о безопасности системы в целом.

2.1.1. Критерии для построенной модели

Для того чтобы перейти от обоснования востребованности задачи построения модели криптовалюты, реализующей метод доказательства доли владения, к её непосредственной формулировке, рассмотрим критерии, которым должна удовлетворять построенная модель, позволяющие эффективно использовать модель в анализе существующих и разработке новых блокчейн-систем (криптовалют в частности):

- Модульность
 - Каждая функциональность должна быть представлена как набор компонент модели, описанных независимо и предъявляющие друг к другу некоторый набор требований.

- Детализированность
 - Всякое сформулированное войство должно быть либо доказано для приведенной конструкции, либо вынесено в требования для компоненты, используемой этой конструкцией.
- Эффективность
 - Для разрабатываемой модели должна быть показана эффективность её реализации на практике, причем эффективная реализация должна лишь реализовывать требования модели, не изменяя составляющие.

Требование эффективности особенно важно потому что ... TODO

2.2. Существующие попытки построения модели криптовалюты

Во всех документах, рассмотренных в таблице 1.1 приводится техническое описание (разной степени детализации) системы в целом, но ни в одной из них не была предпринята попытка модульного (поэтапного) построения формальной модели. Приведенные же модели, даже в случае достижения высокой степени детализации, слабо подходят для дальнейшего анализа в силу своей монолитности, большого объёма.

Авторы статьи, предлагающей дизайн криптовалюты Tezos ([23, 2.1 Mathematical representation]) предлагают некоторую математическую нотацию для формирования модульной модели криптовалюты, однако используют её только для описания понятия глобального состояния и блока как изменения этого состояния (самых базовых понятий), в дальнейшем описании дизайна системы нотация не используется. Авторы технической спецификации Ethereum [25] достаточно подробно вводят формулировки состояния, однако все структуры, равно как и логика валидации, описаны как части одной цельной (и довольно громоздкой) модели, без модульной структуры.

В статьях, посвященных описанию и анализу консенсус алгоритмов (не криптовалют целиком), таких как Ouroboros [14], Algorand [16], авторами предлагается только математическая модель консенсус-алгоритма, к остальным компонентам системы предъявляется набор требований (но описание этих компонент выходит за рамки тем данных работ).

2.2.1. Фреймворк Scorex

Авторы фреймворка Scorex [30] поставили своей целью создание модульного фреймворка для прототипирования различных блокчейн-систем. Фреймворк разработан на языке Scala и сопровождается достаточно подробной документацией [31], объясняющей основные концепции, стоящие за фреймворком. Авторы фреймворка отдельно выделяют транзакционный уровень, уровень консенсуса. Это единственная известная автору попытка построения модели криптовалюты в общем смысле.

Как негативный фактор, в документации описываются только некоторые отдельные компоненты модели. Сведение отдельных компонент в единую модель в документации отсутствует. Код фреймворка на Scala, впрочем может рассматриваться как модель криптовалюты (в достаточно общем смысле). Однако, следует заметить, реализация многих компонент Scorex не является абстрактным обобщением конструкций, но является упрощенной реализацией таковых, позволяющей использовать их в прототипировании других компонент.

2.2.2. Модели криптовалют с PoS

Автору неизвестны детальные модели криптовалют, построенные для консенсус-алгоритмов, реализующих метод доказательства доли владения (PoS).

В фреймворке Scorex [30] приведена лишь абстрактная модель, без специализации относительно метода PoS. Кроме того, отсутствие последовательной формулировки модели в документации является минусом (код на Scala часто слишком специализирован, чтобы использовать его для построения абстрактной модели, не следующей определениям аналогичным принятым в коде).

Спецификация Ethereum достаточно детальна, но не предлагает модульной модели и кроме того относится к системе, использующей консенсус-алгоритм, реализующий метод доказательства выполнения работы.

Спецификации систем, реализующих метод доказательства доли владения EOS [27], NEM [22], Peercoin [28] не удовлетворяют требованиям детали-

зации. Спецификация криптовалюты NEM выделяется сравнительно полной детализацией, однако авторами не приводится формальная модель. Кроме того, в последующих главах будет указано на несколько несогласованностей в дизайне этой криптовалюты.

2.3. Цели настоящей работы

Резюме

В данной главе была сформулирована задача построения модели криптовалюты на основе консенсус-алгоритма, использующего метод доказательства доли владения, рассмотрены предыдущие попытки её решения. Задача была разбита на составляющие, были сформулированы критерии для оценки составляющих. На основе проведенного анализа критериев и составляющих, были сформулированы цели настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TODO Заключение

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bitcoin blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://bitcoin.org>.
2. NXT blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://nxtplatform.org>.
3. Cardano blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cardano.org/en/home>.
4. Ethereum blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://ethereum.org>.
5. NEO blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://neo.org>.
6. Namecoin blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://namecoin.org>.
7. Disciplina blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://disciplina.io>.
8. Lamport Leslie [и др.]. Paxos made simple // ACM Sigact News. 2001. Т. 32, № 4. С. 18–25.
9. Ongaro Diego, Ousterhout John K. In search of an understandable consensus algorithm. // USENIX Annual Technical Conference. 2014. С. 305–319.
10. Nakamoto Satoshi. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008.
11. Garay Juan, Kiayias Aggelos, Leonardos Nikos. The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications // Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques / Springer. 2015. С. 281–310.
12. ZCash blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://z.cash>.
13. IOTA blockchain. [Электронный ресурс]. URL: <https://iota.org>.
14. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol / Aggelos Kiayias, Alexander Russell, Bernardo David [и др.] // Annual International Cryptology Conference / Springer. 2017. С. 357–388.
15. Bentov Iddo, Pass Rafael, Shi Elaine. Snow White: Provably Secure Proofs of Stake. // IACR Cryptology ePrint Archive. 2016. Т. 2016. с. 919.
16. Micali Silvio. Algorand: The efficient and democratic ledger // arXiv preprint arXiv:1607.01341. 2016.

17. Miller Andrew, Xia Yu, Croman Kyle [и др.]. The Honey Badger of BFT Protocols. Cryptology ePrint Archive, Report 2016/199. 2016. <https://eprint.iacr.org/2016/199>.
18. Pedersen Torben Pryds. A Threshold Cryptosystem without a Trusted Party // Advances in Cryptology — EUROCRYPT '91 / под ред. Donald W. Davies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. С. 522–526.
19. Hyperledger: permissioned blockchain framework. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hyperledger.org>.
20. Danezis George, Meiklejohn Sarah. Centrally Banked Cryptocurrencies // CoRR. 2015. T. abs/1505.06895. URL: <http://arxiv.org/abs/1505.06895>.
21. Maymounkov Petar, Mazieres David. Kademlia: A peer-to-peer information system based on the xor metric // International Workshop on Peer-to-Peer Systems / Springer. 2002. С. 53–65.
22. NEM Technical reference. [Электронный ресурс]. URL: https://nem.io/wp-content/themes/nem/files/NEM_techRef.pdf.
23. Goodman LM. Tezos: A self-amending crypto-ledger position paper. [Электронный ресурс]. 2014. URL: https://www.tezos.com/static/papers/white_paper.pdf.
24. Goldwasser Shafi, Micali Silvio, Rackoff Charles. The knowledge complexity of interactive proof systems // SIAM Journal on computing. 1989. Т. 18, № 1. С. 186–208.
25. Wood Gavin. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. 2014. URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>.
26. Bitcoin developer documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://bitcoin.org/en/developer-documentation>.
27. EOS Technical whitepaper. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EOSIO/Documentation/blob/master/TechnicalWhitePaper.md>.
28. Peercoin whitepaper. [Электронный ресурс]. URL: <https://peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper.pdf>.
29. Bentov Iddo, Gabizon Ariel, Mizrahi Alex. Cryptocurrencies Without Proof of Work // Financial Cryptography and Data Security / под ред. Jeremy Clark,

- Sarah Meiklejohn, Peter Y.A. Ryan [и др.]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. С. 142–157.
30. Chepurnoy Alex. Scorex 2.0 framework. [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://github.com/ScorexFoundation/Scorex>.
31. Chepurnoy Alex. Scorex 2.0 framework tutorial. [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://github.com/ScorexFoundation/ScorexTutorial/blob/master/scorex.pdf>.