

УДК 004.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.053](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.053)

Система управления цифровыми дипломами на основе Hyperledger Fabric

Л.В. Агамиров^{1,2,3}, В.Л. Агамиров^{1,2}, Н.В. Тутова^{1✉}, С.А. Базунов⁴,
К.И. Кожевников⁴, М.В. Щелкунов⁴

¹Московский технический университет связи и информатики, Москва,
Российская Федерация

²Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
Российская Федерация

⁴Университет БРИКС, Москва, Российская Федерация

Резюме. Актуальность исследования обусловлена глобальной проблемой фальсификации документов об образовании, что наносит существенный ущерб работодателям, учебным заведениям и обществу в целом. В связи с этим статья направлена на разработку и анализ децентрализованной системы верификации и хранения дипломов на основе блокчейн-платформы Hyperledger Fabric. Спроектирована распределенная архитектура системы с участием ключевых стейкхолдеров: университетов, работодателей и министерства образования. Реализован прототип системы, включающий смарт-контракты для выпуска, проверки и отзыва дипломов, а также настроены политики одобрения транзакций и приватные каналы для обеспечения конфиденциальности. Приведено сравнение предложенной системы на основе Hyperledger Fabric с традиционными централизованными системами и публичными блокчейнами. Результаты показали, что предложенное решение обеспечивает неизменяемость данных, мгновенную проверку подлинности и исключает необходимость в централизованном доверенном посреднике. Таким образом, использование Hyperledger Fabric открывает перспективы для создания прозрачных, безопасных и эффективных национальных и международных систем управления образовательными документами. Виртуальные машины размещены в открытом доступе. Материалы статьи имеют практическую ценность для специалистов в области блокчейн-технологий, цифровизации образования и управления персоналом.

Ключевые слова: блокчейн, Hyperledger Fabric, распределенный реестр, цифровые дипломы, верификация документов, смарт-контракты, децентрализованные системы, конфиденциальность данных, доверенная сеть.

Для цитирования: Агамиров Л.В., Агамиров В.Л., Тутова Н.В., Базунов С.А., Кожевников К.И., Щелкунов М.В. Система управления цифровыми дипломами на основе Hyperledger Fabric. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2106> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.053

A Hyperledger Fabric-based digital diploma management system

L.V. Agamirov^{1,2,3}, V.L. Agamirov^{1,2}, N.V. Toutova^{1✉}, S.A. Bazunov⁴,
K.I. Kozhevnikov⁴, M.V. Shchelkunov⁴

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow,
the Russian Federation

²Moscow Aviation Institute, Moscow, the Russian Federation

³National Research University «MPEI», Moscow, the Russian Federation

⁴BRICS University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the global problem of falsification of educational documents, which causes significant damage to employers, educational institutions, and society as a whole. In this regard, the article aims to develop and analyze a decentralized system for verification and storage of diplomas based on the Hyperledger Fabric blockchain platform. A distributed system architecture was designed with the participation of key stakeholders: universities, employers, and the Ministry of Education. A system prototype has been implemented, including smart contracts for issuing, verifying, and revoking diplomas, and endorsement policies and private channels have been configured to ensure confidentiality. A comparison of the proposed Hyperledger Fabric-based system with traditional centralized systems and public blockchains is provided. The results showed that the proposed solution ensures data immutability, instant verification of authenticity, and eliminates the need for a centralized trusted intermediary. Thus, the use of Hyperledger Fabric opens up prospects for creating transparent, secure, and efficient national and international systems for managing educational documents. The virtual machines are publicly available. The materials of the article are of practical value to specialists in the field of blockchain technologies, digitalization of education, and human resource management.

Keywords: blockchain, Hyperledger Fabric, distributed ledger, digital diplomas, document verification, smart contracts, decentralized systems, data privacy, trusted network.

For citation: Agamirov L.V., Agamirov V.L., Toutova N.V., Bazunov S.A., Kozhevnikov K.I., Shchelkunov M.V. A Hyperledger Fabric-based digital diploma management system. *Modeling, optimization and information technologies*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2106> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.053

Введение

Проблема подлинности и верификации дипломов и сертификатов остается актуальной во всем мире, поскольку подделка документов об образовании наносит серьезный ущерб работодателям, образовательным учреждениям и самим специалистам. В традиционной системе проверка дипломов требует времени, зачастую связана с бюрократическими процедурами и подразумевает необходимость полного доверия к централизованному источнику, будь то конкретный вуз или государственный реестр. При этом каждая организация хранит данные разрозненно, что усложняет межведомственное взаимодействие и повышает риски утраты или искажения информации.

Современные блокчейн-технологии, в частности, платформы корпоративных распределенных реестров, такие как Hyperledger Fabric (HLF) [1], предлагают новый подход к решению этих проблем. Использование распределенного реестра открывает возможность построения безопасной, прозрачной и децентрализованной платформы для хранения и проверки дипломов, где доверие распределено между несколькими независимыми организациями. Такая архитектура позволяет исключить единый центр контроля, повысить надежность данных и обеспечить мгновенную проверку подлинности документа в любой точке мира.

Технология блокчейн находит свое применение в области науки и образования. Так, в работе [2] блокчейн использовался для хранения и верификации академических работ. Возможность применения цифрового рубля и смарт-контрактов в системе образования РФ рассмотрена в работе [3]. Возможность использования блокчейна для проверки подлинности дипломов обсуждалась в работе [4]. Подробный обзор публикаций на тему использования блокчейн в образовании приведен в [5].

В данной работе представлен прототип системы управления цифровыми дипломами на базе Hyperledger Fabric. Исследуются архитектурные подходы, включая модель участников сети, организацию приватных каналов и разработку смарт-контрактов (*chaincode*). Анализируются ключевые преимущества данного решения по

сравнению с традиционными централизованными системами и публичными блокчейнами, а также оцениваются перспективы его масштабирования и внедрения в реальные процессы.

Материалы и методы

В качестве технологической основы системы была выбрана платформа HLF – модульный фреймворк с открытым исходным кодом для разработки корпоративных решений на основе распределенных реестров. В отличие от публичных блокчейнов, таких как Bitcoin или Ethereum, HLF ориентирован на использование в бизнес-средах, где все участники идентифицированы и проходят процедуру авторизации. Это обеспечивает необходимый уровень конфиденциальности, масштабируемости и контроля над доступом.

Ключевыми особенностями Fabric, определившими его выбор, являются: разрешенный (*permissioned*) характер сети, поддержка приватных каналов, гибкие политики одобрения транзакций и высокая производительность [1, 6].

Ключевые особенности и архитектурные преимущества HLF [7]:

1. Разрешенный доступ (*Permissioned Network*). Участие в сети требует авторизации, что подходит для корпоративных консорциумов, где конфиденциальность данных и соответствие нормативным требованиям являются критически важными.

2. Модульная архитектура. Платформа построена по модульному принципу, что позволяет гибко настраивать такие компоненты, как службы управления членством, консенсусные алгоритмы и базы данных для хранения состояния (например, LevelDB или CouchDB).

3. Высокая производительность и масштабируемость. Благодаря отделению этапа исполнения транзакции (*Execute*) от этапа их упорядочивания (*Order*) и проверки (*Validate*), HLF достигает высокой пропускной способности, измеряемой сотнями и тысячами транзакций в секунду.

4. Поддержка смарт-контрактов на языках общего назначения. В терминологии HLF смарт-контракты называются «чейнкодами» (*chaincode*). В отличие от Ethereum, где используется специализированный язык Solidity, чейнкоды в HLF можно разрабатывать на популярных языках программирования, таких как Go, Java и JavaScript, что значительно снижает порог входа для разработчиков и позволяет использовать богатую экосистему существующих библиотек и инструментов.

5. Приватность данных через каналы (*Channels*). HLF позволяет создавать изолированные подсети – каналы. Каждый канал имеет собственный распределенный реестр (*ledger*), доступ к которому имеют только его участники. Это позволяет конкурирующим организациям работать в рамках одной блокчейн-сети, не раскрывая свои конфиденциальные транзакции всем участникам консорциума.

6. Гибкие политики одобрения (*Endorsement Policies*). Платформа позволяет определять правила, согласно которым транзакция считается действительной. Политика одобрения указывает, какие именно организации-участники (или их подмножество) должны подписать транзакцию, чтобы она была принята в сеть. Это позволяет моделировать сложные бизнес-процессы, требующие множественных согласований.

Традиционные блокчейны (цикл "Order-Execute") требуют, чтобы все узлы исполняли каждую транзакцию, что ограничивает производительность. HLF использует инновационный цикл "Execute-Order-Validate":

1. Исполнение (*Execute*). Чейнкод выполняется на узлах, указанных в политике одобрения. Узлы имитируют транзакцию, создавая наборы "прочитанных-записанных" данных (*Read-Write Set*), и подписывают результат.

2. Упорядочивание (*Order*). Подписанные транзакции передаются службе упорядочивания (*Orderer*), которая собирает их в блоки, обеспечивая единый порядок для всех участников сети с использованием подключаемого механизма консенсуса (например, Raft).

3. Проверка (*Validate*). Блоки рассылаются всем узлам канала. Узлы проверяют транзакции на соответствие политикам одобрения и на отсутствие конфликтов (проверяя, не были ли изменены данные, прочитанные на этапе исполнения), после чего применяют валидные транзакции к своему экземпляру реестра.

Такой подход позволяет достичь параллельного исполнения транзакций, значительно повышая общую производительность сети.

Архитектура системы верификации и хранения дипломов строится вокруг ключевых участников сети, каждый из которых разворачивает собственные реер-узлы, хранящие копии распределенного реестра. Участник Org1 представляет университет и отвечает за выпуск дипломов. Внутри этой организации может быть реализовано разграничение прав, например, кафедра и деканат могут выступать в роли отдельных подразделений, каждое из которых обладает собственными сертификатами в рамках MSP (Membership Service Provider) для подписи транзакций. Участник Org2 включает работодателей, которым предоставляется доступ на чтение для мгновенной проверки подлинности дипломов кандидатов. Участник Org3 соответствует Министерству образования, выполняющему надзорные функции: оно имеет право просматривать все транзакции и инициировать отзыв дипломов. Для обеспечения конфиденциальности взаимодействия между этими участниками создается отдельный канал *certificates-channel*. Все транзакции, связанные с дипломами, происходят внутри этого канала, что гарантирует недоступность данных для посторонних участников сети.

Бизнес-логика системы инкапсулирована в *chaincode* (смарт-контракт), развернутый на канале. Основные функции *chaincode* включают следующие операции:

- *issueCertificate* (*studentId*, *degree*, *date*) – выпуск диплома;
- *verifyCertificate* (*certId*) – проверка подлинности диплома;
- *revokeCertificate* (*certId*) – отзыв диплома.

Данные о дипломах хранятся в состоянии мира (*world state*) в базе данных *CouchDB*, что позволяет выполнять сложные запросы. Структура записи представлена ниже (Листинг 1).

```
{ "certId": "CERT12345", *
  "studentId": "S12345", *
  "degree": "Bachelor of Computer Science", *
  "issuedBy": "Org1University", *
  "date": "2025-06-30", *
  "status": "valid" * }
```

Листинг 1 – Структура данных диплома в World State
Listing 1 – Diploma data structure in World State

Для критических операций, таких как выпуск и отзыв диплома, настраиваются политики одобрения (*Endorsement policy*). Например, политика AND('Org1.department', 'Org1.deanery') требует подписи как от кафедры, так и от деканата для выпуска диплома, что исключает возможность злоупотреблений. Пример реализации функции выпуска диплома представлен ниже (Листинг 2).

```

async issueCertificate(ctx, certId, studentId, degree, date) {
  // Проверка прав вызывающего клиента*
  const clientId = ctx.clientIdentity.getID();*
  // ... логика проверки ...*

  const certificate = {*
    certId,*
    studentId,*
    degree,*
    issuedBy: ctx.clientIdentity.getMSPID(),*
    date,*
    status: 'valid'*
  },*

  await ctx.stub.putState(certId, Buffer.from(JSON.stringify(certificate)));*}

```

Листинг 2 – Пример функции выпуска диплома в chaincode
Listing 2 – Example of the diploma issuance function in chaincode

Взаимодействие с сетью осуществляется через клиентские приложения, использующие Fabric SDK (Рисунок 1). Клиенты инициируют транзакции, которые проходят этапы одобрения (*endorsement*), упорядочивания (*ordering*) и фиксации (*commit*). Узлы *Ordered* (например, на основе Raft) обеспечивают консенсус и формирование блоков, которые затем рассылаются на все реер-узлы канала для обновления реестра.

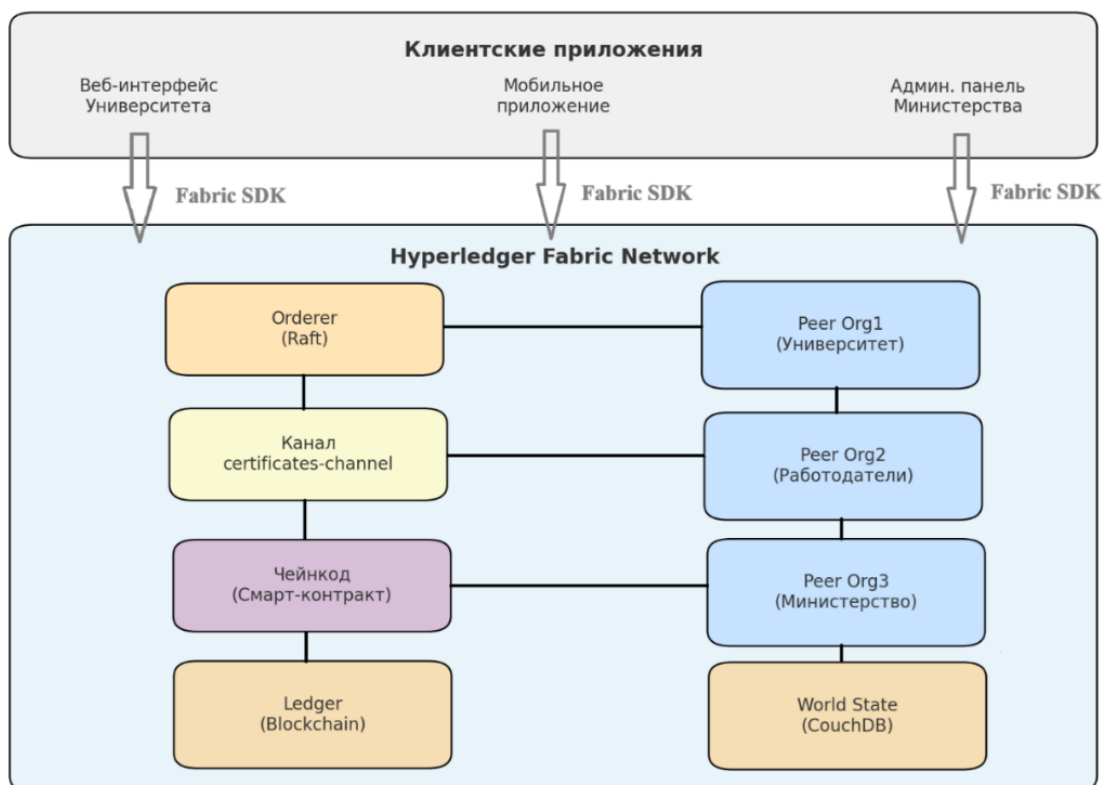


Рисунок 1 – Схема архитектуры системы
Figure 1 – System architecture diagram

Также по ссылкам можно скачать и развернуть бэкапы в ova-формате подготовленных виртуальных машин: VMware¹ (на 8 ядер + 16 ГБ оперативной памяти), VirtualBox² (на 4 ядра + 4 ГБ оперативной памяти + 16 ГБ диск).

Результаты

В ходе исследования был разработан и развернут функциональный прототип системы управления дипломами на основе Hyperledger Fabric. Экспериментальная проверка работы прототипа проводилась в изолированной тестовой среде со следующей конфигурацией.

Виртуальная инфраструктура:

- виртуальная машина Oracle VM VirtualBox;
- гостевая операционная система Debian 12 (минимальная установка);
- ресурсы виртуальной машины: 6 vCPU, 8 ГБ оперативной памяти, 45 ГБ SSD-диск;
- сеть NAT с перенаправлением портов.

Kubernetes-кластер:

- оркестратор Minikube v1.32.1 с драйвером Docker;
- файловая система NFS для постоянного хранилища;
- контейнерная среда Docker CE.

Конфигурация Hyperledger Fabric:

- версия 2.4.0;
- 3 организации (Org1, Org2, Org3);
- 5 orderer-узлов (Raft консенсус), по 2 peer-узла на организацию;
- база данных состояний CouchDB 3.3.0;
- канал "mychannel" с политиками безопасности.

Инструменты тестирования:

- модульное тестирование чейнкода: MockStub из пакета shim;
- интеграционное тестирование: Fabric SDK через REST API;
- мониторинг: Hyperledger Explorer на порту 8080.

Эффективность предложенного решения оценивалась по ряду ключевых критериев в сравнении с традиционными централизованными системами и публичными блокчейнами (Таблица 1) [8].

Таблица 1 – Сравнительный анализ систем управления дипломами
Table 1 – Comparative analysis of diploma management systems

Критерий	Централизованная система	Публичный блокчейн (Ethereum)	Hyperledger Fabric
Безопасность и неизменяемость	Зависит от одного центра, уязвима к внутренним угрозам	Высокая, но данные публичны	Высокая, данные доступны только участникам канала
Скорость проверки	Задержки из-за бюрократических процедур	Зависит от загрузки сети, комиссия за газ	Мгновенная, комиссии отсутствуют
Конфиденциальность	Контролируется администратором	Отсутствует (псевдоанонимность)	Полная, за счёт частных каналов

¹ VMware. Яндекс Диск. URL: <https://disk.yandex.ru/d/1XPSyIFdX98CA> (дата обращения: 08.10.2025).

² VirtualBox. Яндекс Диск. URL: <https://disk.yandex.ru/d/oFzuTpQSajoVGw> (дата обращения: 08.10.2025).

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

Масштабируемость	Ограничена мощностью центрального сервера	Ограничена пропускной способностью сети	Высокая, сотни транзакций в секунду
Стоимость эксплуатации	Затраты на поддержку инфраструктуры	Переменные комиссии за газ	Отсутствие комиссий, затраты на инфраструктуру участников
Гибкость и управление	Высокая, но централизованная	Низкая, правила сети фиксированы	Высокая, гибкие политики одобрения и <i>MSP</i>

Экспериментальная проверка подтвердила корректность выполнения всех основных операций. Полное развертывание кластера занимает 5–10 минут после запуска Minikube.

Таблица 2 – Оценка функциональности прототипа на Hyperledger Fabric
Table 2 – Functionality assessment of the Hyperledger Fabric prototype

Функция	Результат	Среднее время выполнения (с)	Примечание
Выпуск диплома	Успешно	~4,2	Включая процесс одобрения по политике (2 подписи) и консенсус Raft
Проверка диплома	Успешно	<1,2	Запрос к World State (CouchDB) через peer-узел
Отзыв диплома	Успешно	~4,5	Включая обновление статуса и рассылку блока
Просмотр истории транзакций	Успешно	~2,1	Запрос к блочной цепи (<i>blockchain</i>)

Таким образом, прототип продемонстрировал, что Hyperledger Fabric обеспечивает выполнение всех заявленных требований: безопасность, конфиденциальность, высокая производительность и гибкость управления.

Обсуждение

Разработанная система наглядно демонстрирует потенциал разрешенных блокчейн-платформ для решения актуальных проблем в социально значимых сферах. Ключевым преимуществом подхода является перераспределение доверия от единого центра к консорциуму организаций, каждая из которых верифицирует целостность данных независимо.

Области применения системы не ограничиваются дипломами. Аналогичная архитектура может быть использована для управления сертификатами о повышении квалификации, лицензиями, медицинскими книжками и другими типами документов,

требующими проверки подлинности. В перспективе возможно создание единой национальной или транснациональной образовательной блокчейн-экосистемы.

Сравнение с альтернативами выявило явные преимущества Hyperledger Fabric для корпоративных сценариев. В отличие от публичных блокчейнов, Fabric обеспечивает необходимый уровень конфиденциальности и контроля доступа, что критически важно для работы с персональными данными. По сравнению с централизованными реестрами, распределенная архитектура устраняет единые точки отказа и злоупотребления.

Одним из перспективных направлений развития системы является интеграция с системами цифровой идентификации (например, на основе самосуверенной идентичности (SSI) [9] и использование нулевого разглашения (zero-knowledge proofs) [10] для верификации факта наличия диплома без раскрытия его конкретных данных. Это позволит повысить приватность для студентов.

Однако внедрение таких систем сталкивается с вызовами, в первую очередь, организационного и нормативного характера. Необходима разработка единых стандартов и нормативной базы, регулирующей юридическую силу цифровых дипломов в блокчейне. Кроме того, требуется преодоление инерции образовательных институтов и инвестиции в ИТ-инфраструктуру.

Несмотря на это, технологическая зрелость платформ подобных Hyperledger Fabric и растущее понимание их преимуществ со стороны государства и бизнеса позволяют прогнозировать активное развитие подобных решений в ближайшей перспективе.

Заключение

1. Разработан и реализован прототип системы управления цифровыми дипломами на основе Hyperledger Fabric, демонстрирующий возможность построения децентрализованной, безопасной и эффективной платформы для взаимодействия университетов, работодателей и регуляторов.

2. Архитектура системы включает приватный канал для конфиденциальности, гибкие политики одобрения транзакций и смарт-контракты, автоматизирующие ключевые процессы выпуска, проверки и отзыва дипломов.

3. Проведенный сравнительный анализ подтвердил преимущества предложенного решения перед традиционными централизованными системами и публичными блокчейнами по таким критериям, как скорость, стоимость, конфиденциальность и управляемость.

4. Экспериментальная оценка прототипа показала высокую производительность: время проверки подлинности диплома составляет менее 1 секунды, что кардинально снижает издержки верификации для работодателей.

5. Обоснована перспективность масштабирования системы до уровня национальной образовательной инфраструктуры, а также ее адаптации для управления иными типами документов.

6. Определены ключевые вызовы внедрения, связанные с нормативным регулированием и организационными изменениями, и намечены пути их преодоления.

7. Подчеркнута важность обеспечения приватности пользователей и необходимость дальнейших исследований в области интеграции с передовыми технологиями цифровой идентичности.

8. Результаты работы обладают практической ценностью для органов управления образованием, учебных заведений, HR-специалистов и разработчиков корпоративных блокчейн-решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Androulaki E., Barger A., Bortnikov V., et al. Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. In: *EuroSys '18: Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference, 23–26 April 2018, Porto, Portugal*. New York: Association for Computing Machinery; 2018. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>
2. Toutova N.V., Gaeva A.P., Agamirov V.L., Agamirov L.V., Andreev I.A. Blockchain in Education: A New Approach to Storing and Verification of Academic Works. In: *2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), 13–15 November 2024, Moscow, Russia*. IEEE; 2024. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIRVED63561.2024.10769792>
3. Слядников П.Е., Ерохин А.Г., Ванина М.Ф., Тутова Н.В. Концепция применения цифрового рубля и смарт-контрактов в рамках цифровой трансформации системы образования РФ. В сборнике: *Технологии информационного общества: Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции, 27–28 февраля 2024 года, Москва, Россия*. Москва: МТУСИ; 2024. С. 300–303.
4. Михаэлис В.В., Михаэлис С.И. Блокчейн как сервис защиты информации о подлинности дипломов об образовании. *Инженерный вестник Дона*. 2023;(4). <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8322>
Mikhaelis V.V., Mikhaelis S.I. Blockchain as a Service for Protecting Information About the Authenticity of Educational Diplomas. *Engineering Journal of Don*. 2023;(4). (In Russ.). <http://www.ivdon.ru/en/magazine/archive/n4y2023/8322>
5. Shekhar Sh., Chandrasekaran K., Simon S., Mathew J. A Comprehensive Review of Blockchain in Education: Applications and Future Prospects. *Pacific Business Review*. 2025;17(9). <https://doi.org/10.1109/PBRI61888.2025.10700241>
6. Cachin Ch. Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric. Zurich – IBM Research. URL: https://www.zurich.ibm.com/dccl/papers/cachin_dccl.pdf [Accessed 10th October 2025].
7. Nguyen M.Q., Loghin D., Dinh T.T.A. Understanding the Scalability of Hyperledger Fabric. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.09886> [Accessed 10th October 2025].
8. Thakkar P., Nathan S., Viswanathan B. Performance Benchmarking and Optimizing Hyperledger Fabric Blockchain Platform. In: *2018 IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), 25–28 September 2018, Milwaukee, WI, USA*. IEEE; 2018. P. 264–276. <https://doi.org/10.1109/MASCOTS.2018.00034>
9. Pava-Díaz R.A., Gil-Ruiz J., López-Sarmiento D.A. Self-Sovereign Identity on the Blockchain: Contextual Analysis and Quantification of SSI Principles Implementation. *Frontiers in Blockchain*. 2024;7. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1443362>
10. Sun X., Yu F.R., Zhang P., Sun Zh., Xie W., Peng X. A Survey on Zero-Knowledge Proof in Blockchain. *IEEE Network*. 2021;35(4):198–205. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000473>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Агамиров Левон Владимирович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Московский технический университет связи и информатики, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация.
e-mail: itno_agamirov@mail.ru
ORCID: [0009-0009-6909-9399](https://orcid.org/0009-0009-6909-9399)

Levon V. Agamirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Research University "MPEI", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow Aviation Institute, Moscow, the Russian Federation.

Агамиров Владимир Леонович, кандидат технических наук, доцент, Московский технический университет связи и информатики, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация.

e-mail: avhere@yandex.ru

ORCID: [0000-0001-9181-7726](https://orcid.org/0000-0001-9181-7726)

Vladimir L. Agamirov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow Aviation Institute, Moscow, the Russian Federation.

Базунов Сергей Александрович, студент, Университет БРИКС, Москва, Российская Федерация.

e-mail: bazunovsergei01@gmail.com

ORCID: [0009-0007-8392-5402](https://orcid.org/0009-0007-8392-5402)

Sergei A. Bazunov, Student, BRICS University, Moscow, the Russian Federation.

Кожевников Константин Игоревич, студент, Университет БРИКС, Москва, Российская Федерация.

e-mail: mail@kozhevnikovspb.ru

ORCID: [0009-0000-9458-3785](https://orcid.org/0009-0000-9458-3785)

Konstantin I. Kozhevnikov, Student, BRICS University, Moscow, the Russian Federation.

Щелкунов Максим Викторович, студент, Университет БРИКС, Москва, Российская Федерация.

e-mail: drujbana@yandex.ru

ORCID: [0009-0009-2701-801X](https://orcid.org/0009-0009-2701-801X)

Maxim V. Shchelkunov, Student, BRICS University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 21.11.2025; принята к публикации 05.12.2025.

The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing 21.11.2025; accepted for publication 05.12.2025.