



## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И АРХИТЕКТУРА БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОРТФОЛИО ДОСТИЖЕНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Родионов А. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Байкальский государственный университет», Иркутск, Российская Федерация,  
e-mail: avr-v@yandex.ru*

Цифровое портфолио достижений обучающихся требует надежных механизмов верификации и сохранности данных. Существующие решения, как правило, основаны на централизованных базах данных и привязаны к отдельным учреждениям, что затрудняет передачу и проверку данных при переходе студентов между организациями или при трудоустройстве. Кроме этого, такие системы имеют проблемы масштабируемости. Перспективным подходом к решению указанных проблем является применение технологии блокчейн. Цель работы – разработка модели и архитектуры блокчейн-системы электронного портфолио достижений обучающихся, обеспечивающей масштабируемость за счет фрактальной (самоподобной) организации подцепочек. В работе предлагается концептуальная модель и фрактальная архитектура блокчейн-системы электронного портфолио достижений, объединяющая преимущества децентрализованных идентификаторов и многоуровневого (иерархического) реестра. Новизна подхода заключается в многоуровневой структуре хранения и подтверждения данных: достижения обучающихся фиксируются на локальных подцепочках, которые фрактально интегрируются в вышестоящие блокчейн-уровни. Такая архитектура позволяет значительно повысить масштабируемость системы за счет параллельной обработки транзакций на множестве цепочек и периодического «якорения» данных на верхнем уровне для обеспечения согласованности. Представлена формальная модель системы: определены основные сущности, структуры данных и операции. Показано, что фрактальная архитектура поддерживает произвольную глубину вложенности уровней, настраиваемую параметрами системы, что обеспечивает гибкую адаптацию под масштаб образовательной структуры (например, образовательное учреждение – регион – страна). Обсуждаются свойства системы в части сохранности и неизменности данных на всех уровнях, проанализирована сложность операций и способность архитектуры к горизонтальному и вертикальному масштабированию. Рассматриваются организационные и технические механизмы интеграции предложенной архитектуры в иерархию управления образованием (организация – регион – федерация), включая направления информационных потоков и порядок взаимодействия с существующими государственными информационными системами. Практическая значимость предложенной модели состоит в возможности ее применения для построения распределенной инфраструктуры учета достижений обучающихся, обеспечивающей высокую пропускную способность и устойчивость к искажениям данных.

**Ключевые слова:** блокчейн, электронное портфолио, фрактальная архитектура, верифицируемые удостоверения, децентрализованные идентификаторы, математическое моделирование, масштабируемость

## CONCEPTUAL MODEL AND ARCHITECTURE OF A BLOCKCHAIN-BASED SYSTEM FOR STUDENTS ELECTRONIC ACHIEVEMENT PORTFOLIOS

Rodionov A. V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Baikal State University”,  
Irkutsk, Russian Federation, e-mail: avr-v@yandex.ru*

A digital portfolio of student achievements requires reliable mechanisms for verification and data security. Existing solutions are usually based on centralized databases tied to individual institutions, which complicates the transfer and verification of data when students transfer between organizations or when applying for a job. In addition, such systems have scalability issues. A blockchain-based system can be a solution. The aim of this work is to develop a model and architecture of a blockchain system for an electronic portfolio of student achievements that ensures scalability through a fractal (self-similar) sub-chain organization. The paper proposes a conceptual model and fractal architecture of a blockchain system for an electronic portfolio of achievements that combines the advantages of decentralized identifiers and a multi-level (hierarchical) registry. The novelty of the approach lies in the multi-level structure of data storage and verification: student achievements are recorded on local sub-chains that are fractally integrated into higher blockchain levels. This architecture significantly increases the scalability of the system due to parallel processing of transactions on multiple chains and periodic “anchoring” of data at the top level to ensure consistency. A formal model of the system is presented: the main entities, data structures and operations are defined. It is shown that the fractal architecture supports an arbitrary nesting depth of levels, configured by the system parameters, which ensures flexible adaptation to the scale of the educational structure (for example, educational institution – region – country). The properties of the system in terms of data safety and immutability at all levels are discussed, the complexity of operations and the ability of the architecture for horizontal and vertical scaling are analyzed. The organizational and technical mechanisms for integrating the proposed architecture into the education management hierarchy (institution – region – federation) are discussed, including information flow directions and interaction with existing government information systems. The practical significance of the proposed model lies in the possibility of its application for building a distributed infrastructure for recording student achievements, ensuring high throughput and resistance to data distortions.

**Keywords:** blockchain, electronic portfolio, fractal architecture, decentralized identifiers, verifiable credentials, mathematical modeling, scalability

## Введение

Портфолио достижений учащегося – сборник свидетельств учебных, научных и внеучебных достижений – рассматривается как инструмент оценки компетенций, способный дополнить или заменить традиционные аттестации [1, 2]. Однако существующие системы портфолио, как правило, централизованы и привязаны к отдельным учреждениям [3], что затрудняет передачу данных при переходе между организациями, подвержены риску компрометации и одностороннего изменения, а верификация документов зависит от доверия к третьей стороне.

Блокчейн привлекает внимание как платформа для защищенного портфолио благодаря децентрализованности, неизменяемости записей и криптографической проверяемости данных [4]. В образовании блокчейн уже применяется, например, в MIT – для выдачи и проверки дипломов<sup>1</sup>, Sony Global Education – для хранения данных о достижениях<sup>2</sup>, университете Никосии – для верификации сертификатов<sup>3</sup>. В методических рекомендациях Минпросвещения РФ приведен пример электронного портфолио школьника как облачного сервиса на основе блокчейна<sup>4</sup>. Платформа EduCTX продемонстрировала применимость блокчейна для систем высшего образования [5]. Однако использование публичных блокчейнов (например, Bitcoin или Ethereum) несмотря на то, что они обеспечивают высокий уровень децентрализации, в масштабах всей системы образования сопряжено с рядом трудностей. Если хранить данные обо всех обучающихся и их достижениях в единой глобальной цепочке блоков, то по мере роста числа пользователей и транзакций возникают проблемы масштабируемости и производительности.

<sup>1</sup> MIT News Office. Digital Diploma debuts at MIT // MIT News. 2017. 17 Oct. [Электронный ресурс]. URL: <https://news.mit.edu/2017/mit-debuts-secure-digital-diploma-using-bitcoin-blockchain-technology-1017> (дата обращения: 05.03.2026).

<sup>2</sup> Sony Global Education; Sony Corporation. New System to Manage Student Data Built on IBM Blockchain // PR Newswire. 2017. 09 Aug. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/sony-and-sony-global-education-develop-a-new-system-to-manage-students-learning-data-built-on-ibm-blockchain-300501707.html> (дата обращения: 05.03.2026).

<sup>3</sup> University of Nicosia. UNIC first to publish all diplomas on the blockchain // Press Release. 2017. 02 Nov. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unic.ac.cy/university-of-nicosia-is-the-first-university-in-the-world-to-publish-diplomas-of-all-graduating-students-on-the-blockchain/> (дата обращения: 05.03.2026).

<sup>4</sup> Министерство просвещения РФ. Методические рекомендации по внедрению современных цифровых технологий в общеобразовательные программы (пример электронного портфолио): распоряжение № Р-44 от 18.05.2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://koiro.edu.ru/centers/tsentr-informatizatsii-obrazovaniya/tsifrovaya-obrazovatel'naya-sreda/docs/rasporiazhenie-minpros-18.05.2020-N-%D0%A0-44.pdf> (дата обращения: 05.03.2026).

Известно, что они обладают ограниченной пропускной способностью (порядка 7–15 транзакций в секунду), что несопоставимо с объемами потенциальных операций, где каждое выставление оценки или выдача диплома/грамоты/свидетельства может рассматриваться как транзакция [6]. Кроме этого, остаются вопросы соответствия использования публичных блокчейнов российскому законодательству. Приватные блокчейны теоретически могут обеспечить большую производительность (например, Hyperledger Fabric способен достигать 1800 транзакций/с при определенных конфигурациях) [7, 8]. Помимо этого, можно задействовать иерархическое (фрактальное) разделение сети на подцепочки, организованные в несколько уровней. При таком подходе транзакции сначала фиксируются на локальных цепочках, а их результаты периодически агрегируются на более высоком уровне, что позволяет существенно повысить суммарную пропускную способность системы. При этом Hyperledger Fabric поддерживает конфиденциальность через механизмы каналов – изолированных подсетей для подгрупп участников, что позволяет реализовать ограниченное распространение данных (селективное деление данных по каналам) [9]. Таким образом, используя приватные блокчейны [10], можно объединить школы и вузы в единую сеть с управляемым доступом, что подходит для соблюдения нормативных требований (особенно в сфере персональных данных), и решить задачу разработки единой масштабируемой архитектуры [11], которую можно развернуть как на уровне отдельного учреждения, так и в масштабе региона или страны.

За последние 2–3 года явно наметился переход от отдельных локальных проектов к экосистемным инициативам, ориентированным на межведомственную и трансграничную проверяемость документов. Так, в рамках European Blockchain Services Infrastructure (EBSI) реализуются сценарии признания микроквалификаций и академических документов<sup>5</sup>, где верификация строится на сочетании VC, кошельков держателя и распределенной инфраструктуры доверия [12]. Одновременно отраслевые спецификации VC развиваются на уровне стандартов (Verifiable Credentials Data Model v2.0)<sup>6</sup>, а модели представления достижений в образовании интегрируются с VC-подходом

<sup>5</sup> European Commission. Micro-credentials – EBSI projects. [Электронный ресурс]. URL: <https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/spaces/EBSI/pages/710119840/Micro+-Credentials> (дата обращения: 05.03.2026).

<sup>6</sup> W3C. Verifiable Credentials Data Model v2.0 // W3C Recommendation. 15 May 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.w3.org/TR/vc-data-model-2.0/> (дата обращения: 05.03.2026).

(Open Badges 3.0)<sup>7</sup>, что делает проблему архитектурной масштабируемости и управляемой федерации реестров особенно актуальной [13, 14].

Необходимо подчеркнуть, что применение технологии распределенного реестра в данной задаче обусловлено не только технологическими, но и организационно-управленческими факторами. Альтернативные централизованные решения (например, единая государственная база данных) сопряжены с рисками единой точки отказа, зависимости от одного оператора и сложностями межведомственного согласования при изменении форматов данных. Цифровые подписи и хеширование сами по себе обеспечивают целостность отдельного документа, но не решают задачу формирования единого реестра статусов (выдача, отзыв, обновление), доступного множеству независимых проверяющих без обращения к центральному посреднику. Блокчейн как инфраструктура доверия позволяет создать такой реестр с гарантиями неизменности на уровне протокола, при этом стоимость владения снижается за счет использования приватных сетей (Hyperledger Fabric), не требующих криптовалютных вознаграждений за обработку транзакций. Таким образом, экономическая целесообразность применения блокчейна обеспечивается использованием разрешенных (permissioned) сетей, в которых отсутствуют комиссии за транзакции и затраты на майнинг, а вычислительные ресурсы сопоставимы с обычной серверной инфраструктурой.

**Цель исследования** – предложить модель и архитектуру блокчейн-системы электронного портфолио достижений обучающихся, обеспечивающей масштабируемость за счет фрактальной организации подцепочек.

#### Моделирование системы

В работе предлагается формальная модель электронного портфолио учащегося, отражающая достижения в виде множества связанных записей. Пусть  $l \in \{0, 1, \dots, L\}$  – уровень управленческой иерархии (например, организация, регион, федерация),  $j \in \{0, 1, \dots, N_j\}$  задает индекс подцепочки на уровне  $l$ . Каждая подцепочка представляется ориентированным ациклическим графом

$$G_{l,j} = (V_{l,j}, E_{l,j}),$$

где  $V_{l,j}$  – множество блоков,  $E_{l,j}$  – множество ребер-ссылок (каждое ребро соответ-

ствует ссылке блока на предшествующий). На практике структура  $G_{l,j}$  является частным случаем DAG и в базовой конфигурации реализует линейную цепочку блоков (ориентированный путь). Представление в виде DAG выбрано как обобщение, допускающее расширение на варианты с дополнительными контрольными ребрами.

Множество подцепочек одного уровня зададим как

$$B_l = \{G_{l,j}\}_{j=1}^{N_l},$$

а всю систему – как объединение по уровням:

$$B = \bigcup_{l=0}^L B_l$$

Параметры  $N_l$  (число подцепочек) и схема ветвления определяются регламентом, например  $N_0$  соответствует числу локальных контуров организаций,  $N_1$  – числу региональных агрегаторов (или отраслевых контуров),  $N_2$  – числу федеральных контуров и т. д. В простейшем случае архитектура образует деревоподобную структуру, где каждой цепочке верхнего уровня соответствуют несколько цепочек на уровень ниже.

Каждому участнику системы (учащемуся, образовательному учреждению, работодателю) соответствует децентрализованный идентификатор (DID), для которого в распределенном реестре хранится DID Document с ключами и сервисными сведениями для аутентификации. Верифицируемое удостоверение (verifiable credentials, VC) – это электронное удостоверение, выпущенное некоторым доверенным издателем (эмитентом) и содержащее набор утверждений (атрибутов) о субъекте. Определим удостоверение как

$$VC = [ID_{vc}, DID_{issuer}, DID_{holder}, A, \sigma],$$

где  $ID_{vc}$  – уникальный идентификатор удостоверения,  $DID_{issuer}$  – DID эмитента (например, образовательной организации, выдавшей документ об успеваемости),  $DID_{holder}$  – DID держателя (учащегося, которого касается удостоверение),  $A$  – набор атрибутов (пар «имя свойства – значение», например, курс = «Математика», оценка = «95»),  $\sigma$  – цифровая подпись издателя, наложенная на содержимое удостоверения.

Таким образом, VC связывает три сущности: *эмитент* (выдавший запись о достижении), *держатель* (учащегося, владельца записи) и *утверждение* (сведения о достижении).

Согласованность уровней обеспечивается механизмом якорения (anchoring) – дочерняя цепочка периодически публикует в

<sup>7</sup> IEdTech. New Open Badges 3.0 Standard Provides Enhanced Security and Mobility. 29 May 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iedtech.org/iedtech-article/new-open-badges-30-standard-provides-enhanced-security-and-mobility/411060> (дата обращения: 05.03.2026).

родительской цепи транзакцию-якорь, фиксирующую криптографический отпечаток ее состояния. Пусть для подцепочки  $G_{l+1,j}$  выделяется дискретная последовательность моментов  $\{t_k\}_{k \geq 1}$  с шагом  $\Delta = t_k - t_{k-1}$ . Определим отпечаток состояния дочерней цепочки на шаге  $k$  как

$$r_k = \text{Anchor}(G_{l+1,j}, t_k).$$

В качестве  $\text{Anchor}(\cdot)$  допускаются два практически применимых варианта: либо хеш последнего блока  $h(b_{\text{last}}^{(k)})$ , либо корень дерева Меркла по множеству транзакций за интервал  $[t_{k-1}, t_k]$ ,

$$r_k = \text{MerkleRoot}(h(\tau_1), h(\tau_2), \dots, h(\tau_m)).$$

Далее в родительскую цепочку уровня  $l$  публикуется транзакция-якорь вида

$$\tau_k^{\text{anc}} = id, \text{DID}_{\text{issuer}}, r_k, ts, \sigma_{\text{org}},$$

где  $id$  – идентификатор якоря,  $\text{DID}_{\text{issuer}}$  – DID публикующего субъекта (организации/агрегатора),  $ts$  – метка времени,  $\sigma_{\text{org}}$  – подпись публикующего субъекта.

Таким образом, родительская цепочка выполняет роль неизменяемого журнала контрольных точек, а проверка целостности сводится к сопоставлению предъявляемых данных с опубликованными якорями. Обзор современных подходов селективного раскрытия для цифровых удостоверений приведен в [12]. В модели зададим функцию доказательства  $Z(VC, Q)$ , где  $Q$  – запрос проверяющего, определяющий требуемый атрибут или условие. Например,  $Q$  может запрашивать: «подтвердите, что студент  $X$  имеет оценку не ниже 90 баллов по предмету  $Y$ » – при этом не нужно раскрывать точную оценку, достаточно криптографически доказать неравенство. Для реализации таких доказательств могут использоваться схемы анонимных удостоверений: в частности, в экосистемах Hyperledger применяются CL-цифровые подписи, позволяющие каждому атрибуту внутри удостоверения быть доказуемым изолированно. Держатель формирует доказательство  $\pi = Z(VC, Q)$ , включающее, например, подмножество атрибутов  $A' \subset A$  и криптографическое доказательство их подлинности и соответствия запросу. Проверяющий, обладая публичным ключом издателя (через DID) и хешем VC из блокчейна, может верифицировать  $\pi$  без доступа к остальным данным.

Схемы, описывающие процесс жизненного цикла электронного удостоверения в рассматриваемой модели при наличии трехуровневой инфраструктуры доверия

(организация → регион → федерация), представлены на рис. 1.

Жизненный цикл данных в системе, представленный на рис. 1, включает следующие ключевые этапы: *инициация*, в рамках которой обучающийся выполняет учебное или внеучебное действие (сдает экзамен, получает сертификат, участвует в олимпиаде), а уполномоченный сотрудник формирует запись о достижении, *эмиссия VC* (смарт-контракт локальной подцепочки создает верифицируемое удостоверение, включающее хэш подтверждающего документа и цифровую подпись эмитента; транзакция фиксируется в локальном блокчейне), *якорение* (по расписанию криптографический отпечаток состояния локальной подцепочки публикуется в цепочке вышестоящего уровня), *хранение и управление* (удостоверение хранится у держателя (off-chain), метаданные и хэш доступны в блокчейне; держатель может управлять статусом), *верификация* (внешний проверяющий направляет запрос; держатель формирует доказательство с селективным раскрытием необходимых атрибутов; проверяющий сопоставляет доказательство с данными блокчейна и подтверждает подлинность), *отзыв* (эмитент публикует транзакцию отзыва, после чего удостоверение перестает проходить верификацию). Схема представлена на рис. 2.

Полные транзакции обрабатываются в параллельных подцепочках нижних уровней, а на верхние уровни выводятся только якорные транзакции. Пусть пропускная способность одной локальной подцепочки на нижнем уровне  $L$  равна  $\lambda$  транзакций/с. Тогда суммарная пропускная способность регистрации достижений оценивается как  $\Lambda \approx N_L \cdot \lambda$ , что отражает горизонтальное масштабирование за счет числа подцепочек. Следует учитывать, что данная оценка является верхней границей, поскольку не включает накладные расходы на межцепочечное взаимодействие и латентность консенсуса при якорении.

Нагрузка на родительский уровень определяется частотой якорения  $\alpha$  (якорей/с на одну подцепочку). Тогда суммарная интенсивность якорных транзакций, поступающих на родительский уровень, оценивается как

$$I_{\text{anc}} \approx N_L \cdot \alpha.$$

Следовательно, рост числа эмитентов не приводит к пропорциональному росту нагрузки на верхний уровень при регламентировании параметра  $\alpha$ . Таким образом, масштабируемость достигается не только «параллельностью», но и контролем частоты межуровневой фиксации.



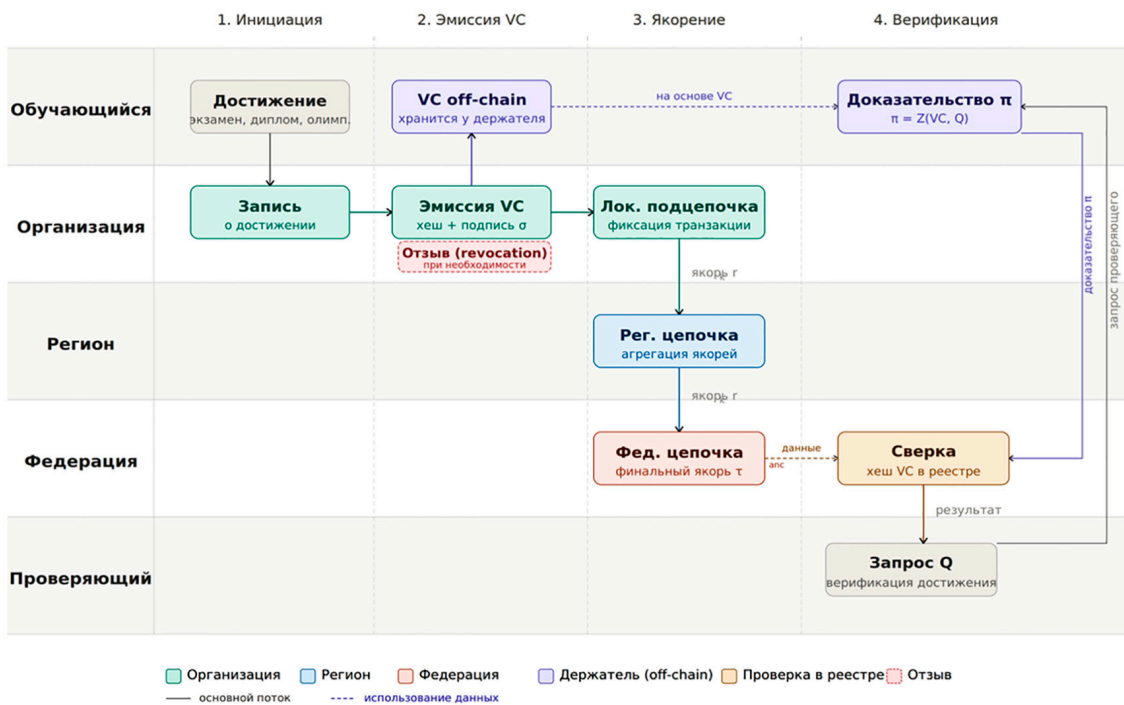


Рис. 2. Жизненный цикл данных от внесения достижения до верификации  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для иллюстрации приведем расчетную оценку производительности. В литературе показано, что Hyperledger Fabric при оптимальной конфигурации достигает пропускной способности порядка 1000–1800 транзакций/с на одном канале [7, 8]. Примем консервативную оценку  $\lambda = 500$  транзакций/с для одной локальной подцепочки. При 100 образовательных организациях ( $N_1 = 100$ ) на нижнем уровне суммарная пропускная способность составляет  $\Lambda \approx 100 \times 500 = 50\,000$  транзакций/с. Для сравнения: классический одноуровневый блокчейн Hyperledger Fabric обеспечивает не более 1800 транзакций/с, а публичные сети (Ethereum) – около 15–30 транзакций/с. Таким образом, фрактальная архитектура обеспечивает прирост пропускной способности на один-два порядка по сравнению с одноуровневым решением. При частоте якорения  $\alpha = 1/60$  (одна транзакция-якорь в минуту на подцепочку) нагрузка на региональный уровень составляет  $\Gamma_{\text{anc}} \approx 100/60 \approx 1,7$  транзакции/с, что пренебрежимо мало по сравнению с пропускной способностью канала.

### Результаты исследования и их обсуждение

Предлагаемая фрактальная архитектура представляет собой многоуровневую сеть блокчейнов, соответствующих различным

административным уровням образовательной системы. Ранее предлагавшиеся решения обычно либо ограничивались рамками одного учреждения (частный блокчейн внутри университета), либо полагались на единый глобальный реестр для всех записей, либо были строго централизованы с возможностью лишь децентрализованной проверки сертификатов [15]. Иерархические мультиблокчейн-архитектуры рассматривались для IoT-сред [6], однако они ориентированы на двухуровневую топологию и не учитывают специфику образовательной иерархии, интеграцию с VC/DID-стандартами и механизмы селективного раскрытия. В качестве примера можно рассмотреть трехуровневую структуру: уровень учебного заведения (школы), уровень регионального (или отраслевого) агрегатора и национальный (центральный) уровень (таблица).

С позиции управления в организационных системах внедрение предлагаемой архитектуры позволяет оптимизировать ряд ключевых управленческих решений.

Во-первых, автоматизируется процесс верификации документов об образовании при трудоустройстве и при переходе обучающихся между организациями, работодатель или приемная комиссия получают возможность мгновенной проверки подлинности без направления запросов в учреждение-эмитент.

## Роли и функции участников по уровням управления

Уровень	Оператор/узел	Ключевые функции	Данные и интерфейсы
Организация	Школа/вуз (узлы сети учреждения)	Выпуск VC; ведение локальной подцепочки достижений; управление статусами/отзывом	Off-chain: VC у держателя; On-chain: хеши/метаданные, статусы. API к ИС учреждения
Регион/отрасль	Региональный агрегатор (узлы консорциума)	Аккредитация эмитентов; публикация якорей; межорганизационная проверка; аудит	On-chain: якоря и реестры доверия. API для межведомственных запросов
Федерация/страна	Национальный контур (уполномоченный оператор)	Политики доверия; межрегиональная верификация; единые правила идентификации и логирования	On-chain: агрегированные якоря/реестры. Интеграция с ГИС

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

Во-вторых, оптимизируется управление аккредитацией образовательных программ, так как региональный агрегатор может оперативно контролировать статус аккредитации и отзывать удостоверения при ее утрате. В-третьих, повышается прозрачность мониторинга образовательных результатов на уровне региона и федерации: агрегированные данные (без раскрытия персональных сведений) позволяют принимать обоснованные решения о распределении ресурсов, корректировке образовательных стандартов и оценке эффективности программ. Наконец, децентрализованная архитектура снижает зависимость от единого оператора системы, что повышает устойчивость управления при организационных и кадровых изменениях.

На нижнем уровне каждое образовательное учреждение ведет собственную локальную блокчейн-цепочку для фиксации достижений обучающихся (оценки, сертификаты, дипломы). Средний (региональный) уровень объединяет группу учреждений: блокчейн-узел региона выполняет функции моста между локальными цепочками и национальной цепью, собирая криптографические якоря и обеспечивая взаимную проверяемость данных. Верхний уровень – центральный блокчейн (например, под управлением Министерства образования), который служит финальным доверительным слоем и хранит глобальный реестр аккредитованных организаций, стандарты удостоверений и списки отозванных документов. Подробнее организационные и технические механизмы интеграции по уровням управления рассмотрены в соответствующем разделе ниже.

При получении учащимся нового достижения уполномоченный эмитент формирует VC через смарт-контракт: присваивает уникальный идентификатор, прикрепляет хеш подтверждающего документа и цифро-

вую подпись, после чего транзакция фиксируется в локальной подцепочке и включается в портфолио. Записи разделяются на публичную часть (общедоступные достижения) и приватную (оценки, персональные данные). Доступ к приватной части регулируется владельцем портфолио через механизм селективного раскрытия [16]: учащийся может предоставить проверяющему криптографическое доказательство конкретного достижения, не раскрывая остальных данных.

#### Модель разграничения прав доступа

Разграничение полномочий участников системы реализуется на основе ролевой модели доступа, встроенной в инфраструктуру Hyperledger Fabric через механизм Membership Service Provider. Выделяются следующие роли: *обучающийся* (держатель портфолио), *образовательная организация* (эмитент удостоверений), *региональный агрегатор* (верификатор и аккредитующий орган), *внешний проверяющий* (работодатель, приемная комиссия). В части соответствия требованиям законодательства о персональных данных (Федеральный закон № 152-ФЗ, GDPR) архитектура реализует принцип минимизации данных: в блокчейн записываются только хеши и метаданные удостоверений, тогда как сами персональные данные хранятся off-chain у держателя и/или эмитента. Механизм селективного раскрытия обеспечивает соблюдение принципа целевого ограничения обработки, так как проверяющий получает только ту информацию, которая необходима для принятия решения. Право на удаление («право на забвение») реализуется через отзыв удостоверения (revocation) на уровне блокчейна и удаление off-chain данных, при этом хеш отозванного удостоверения сохраняется в реестре для обеспечения целостности цепочки, но сам документ становится

ся недоступным для верификации. Узлы Hyperledger Fabric размещаются на территории Российской Федерации, что обеспечивает выполнение требования о локализации хранения персональных данных (ст. 18 ФЗ-152).

*Механизмы интеграции по уровням иерархии управления*

Практическое внедрение предложенной фрактальной архитектуры предполагает четкое определение организационных и технических механизмов интеграции на каждом уровне управленческой иерархии. Рассмотрим эти механизмы подробнее.

Уровень организации (образовательное учреждение). На этом уровне развертывается локальная блокчейн-сеть Hyperledger Fabric, объединяющая узлы (peer-ноды) подразделений учреждения – факультетов, деканатов, учебного управления и т. п. Техническая интеграция с действующей информационной системой вуза (АИС, LMS, IC) осуществляется посредством REST

API шлюза, который транслирует события из внутренних баз данных (выставление оценок, выдача сертификатов) в вызовы смарт-контрактов. Информационный поток направлен снизу вверх – данные о достижениях формируются соответствующими сотрудниками, фиксируются в локальной подцепочке и по расписанию агрегируются в якорные транзакции для передачи на региональный уровень. Организационно для запуска требуется назначение оператора сети (ИТ-служба вуза), утверждение политики доступа (MSP-конфигурация), определение перечня каналов для различных категорий данных (учебные достижения, внеучебная деятельность, дипломы).

Уровень региона (субъект федерации / отраслевой консорциум). Региональный уровень реализуется как консорциумная сеть Hyperledger Fabric, в которую входят узлы региональных органов управления образованием (министерства/департаменты образования субъекта) и ordering-сервис, обеспечивающий упорядочение транзакций.

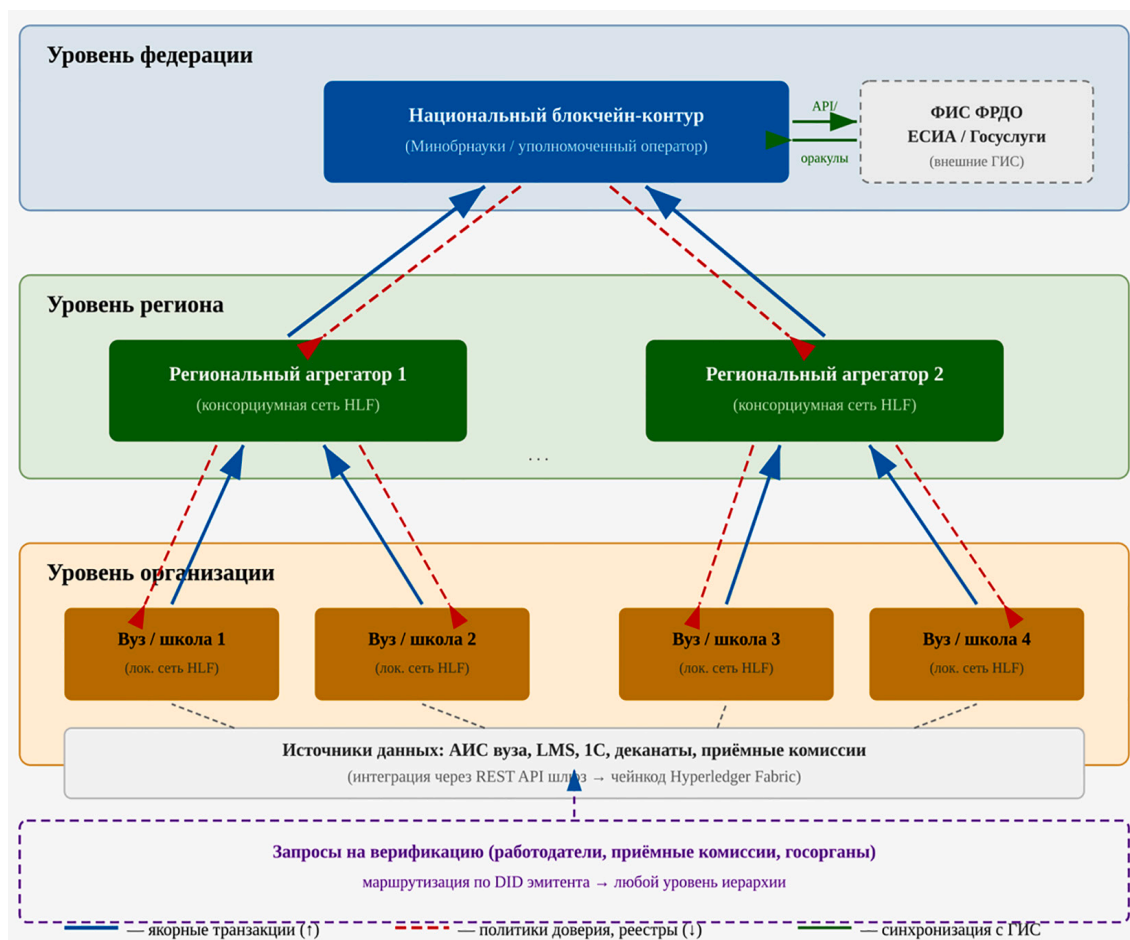


Рис. 3. Схема информационных потоков в предлагаемой архитектуре  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Подключение образовательных организаций региона осуществляется через межсетевое взаимодействие, когда каждая организация-участник регистрируется в MSP регионального консорциума и получает сертификаты для публикации якорных транзакций. Информационные потоки на этом уровне двунаправленные: снизу вверх поступают агрегированные якоря от организаций, а сверху вниз – обновления реестра доверия (аккредитованные эмитенты, списки отозванных удостоверений, шаблоны VC). Региональный оператор также обеспечивает межведомственное взаимодействие – через API шлюзы реализуются запросы проверки достижений от работодателей, приемных комиссий других вузов и государственных органов.

Уровень федерации (национальный). На данном уровне формируется национальная блокчейн-сеть, оператором которой выступает уполномоченный орган (например, Министерство науки и высшего образования РФ или подведомственная организация). Данная сеть принимает якорные транзакции от региональных контуров и ведет национальный реестр аккредитованных образовательных организаций (с их DID), единые политики доверия и стандарты удостоверений. Ключевым элементом интеграции на этом уровне является взаимодействие с существующими государственными информационными системами – ФИС ФРДО (Федеральный реестр сведений о документах об образовании), ЕСИА (Единая система идентификации и аутентификации), портал Госуслуг. Техническая реализация предусматривает использование оракулов и API-адаптеров, позволяющих синхронизировать данные между блокчейн-реестром и указанными системами. Информационный поток на этом уровне преимущественно агрегирующий: от регионов поступают якоря, а федеральный контур предоставляет сервисы верификации любому авторизованному проверяющему на территории страны.

Визуализация описанных информационных потоков представлена на рис. 3.

### Заключение

В работе предложена и обоснована структурированная фрактальная архитектура приватной блокчейн-системы для электронного портфолио достижений обучающихся. Новизна подхода заключается в многоуровневой самоподобной организации реестров: от локальных блокчейн-цепочек факультетов и институтов до интегрирующей цепочки университета и далее до национального уровня. Показано, что та-

кая архитектура позволяет достичь высокой масштабируемости за счет параллельной обработки транзакций на нижних уровнях и периодического якорения данных на верхних уровнях. Аналитическая оценка подтверждает, что суммарная пропускная способность системы возрастает с добавлением новых участников (цепочек), а нагрузка на каждый уровень может быть ограничена небольшим числом агрегированных транзакций. Описаны организационные и технические механизмы интеграции предложенной архитектуры в систему управления образованием на уровнях организации, региона и федерации, включая направления информационных потоков, порядок взаимодействия с существующими государственными информационными системами (ФИС ФРДО, ЕСИА) и принципы межуровневой маршрутизации запросов на верификацию. Применение механизмов селективного раскрытия обеспечивает баланс между прозрачностью и конфиденциальностью. Использование приватной сети Hyperledger Fabric гарантирует управляемость, совместимость с правовой базой (включая требования к локализации хранения данных и их защите).

Дальнейшие исследования предполагают прототипирование системы на базе Hyperledger Fabric и проведение экспериментальной валидации результатов, нагрузочного тестирования. Практическая значимость архитектуры состоит в возможности поэтапного внедрения: на первом этапе учреждение развертывает локальную блокчейн-сеть, на втором – объединяется с другими вузами региона, на третьем – подключается к национальному контуру. Это позволит создать единое цифровое пространство доверия, в котором выпускники смогут управлять своими подтвержденными достижениями, а работодатели – оперативно верифицировать предоставленные документы без посредников.

### Список литературы

1. Аргюшкина Т. А., Котлов В. Н., Землянкин П. Н. Электронное портфолио в профессионально-ориентированном обучении студентов в вузе // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. 2017. № 20. С. 91–95. URL: <https://khsu.ru/science/vestnik/> (дата обращения: 06.03.2026). EDN: KNZFPF.
2. Аликина Е. В., Мальцев Д. В. Оптимизация электронного портфолио студента многопрофильного вуза // Вестник Томского государственного университета. 2023. № 488. С. 14–22. DOI: 10.17223/15617793/488/2.
3. Курмангалиева А. М., Жаманкарин М. М., Айткенова М. К., Таджигитов А. А., Тунгышбаева С. Ж. Разработка структуры информационной системы формирования портфолио обучающегося // Труды университета. 2021. № 2 (83). С. 21–24. URL: <https://tu.kstu.kz/publication/publication/download/36> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.52209/1609-1825\_2021\_2\_21.

4. Chen G., Xu B., Lu M., Chen N.-S. Exploring blockchain technology and its potential applications for education // *Smart Learning Environments*. 2018. Vol. 5. Is. 1. P. 1–10 (дата обращения: 01.03.2026). DOI: 10.1186/s40561-017-0050-x.
5. Turkanović M., Hölbl M., Košič K., Heričko M., Kamišalić A. EduCTX: A Blockchain-Based Higher Education Credit Platform // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 5112–5127. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2789929.
6. Oktian Y. E., Lee S.-G., Lee H. J. Hierarchical Multi-Blockchain Architecture for Scalable Internet of Things Environment // *Electronics*. 2020. Vol. 9. Is. 6. Art. 1050. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/6/1050> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.3390/electronics9061050.
7. Khan M. M., Khan F. S., Nadeem M., Khan T. H., Haider S., Daas D. Scalability and Efficiency Analysis of Hyperledger Fabric and Private Ethereum in Smart Contract Execution // *Computers*. 2025. Vol. 14. Is. 4. Art. 132. URL: <https://www.mdpi.com/2073-431X/14/4/132> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.3390/computers14040132.
8. Androulaki E., Barger A., Bortnikov V. et al. Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains // *Proc. 13th EuroSys Conference (EuroSys '18)*. 2018. Art. 30. P. 1–15. (дата обращения: 01.03.2026). DOI: 10.1145/3190508.3190538.
9. Jeong J., Kim D., Ihm S.-Y., Lee Y. Multilateral Personal Portfolio Authentication System Based on Hyperledger Fabric // *ACM Transactions on Internet Technology*. 2021. Vol. 21. Is. 1. P. 1–17. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3423554> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.1145/3423554.
10. Gräther W., Kolvenbach S., Ruland R., Schütte J., Torres C., Wendland F. Blockchain for Education: Lifelong Learning Passport // *Proc. 1st ERCIM Blockchain Workshop*. 2018. Art. 07. URL: <https://dl.eusset.eu/items/b02679a3-7e9b-4b22-8249-009737a0d52d> (дата обращения: 06.03.2026). DOI: 10.18420/blockchain2018\_07.
11. Xu X., Weber I., Staples M. Architecture for Blockchain Applications. Cham: Springer, 2019. 307 p. DOI: 10.1007/978-3-030-03035-3.
12. Bećirović Ramić Š., Cogo E., Prazina I. et al. Selective disclosure in digital credentials: A review // *ICT Express*. 2024. Vol. 10, Is. 4. P. 916–934. DOI: 10.1016/j.icte.2024.05.011.
13. Bhushan B., Sinha P., Sagayam K. M., Andrew J. Untangling blockchain technology: A survey on state of the art, security threats, privacy services, applications and future research directions // *Computers & Electrical Engineering*. 2023. Vol. 106. Art. 108573. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2022.108573.
14. Raimundo R., Rosário A. Blockchain system in the Higher Education // *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*. 2021. Vol. 11. Is. 1. P. 276–293. DOI: 10.3390/ejihpe11010021.
15. Rustemi A., Dalipi F., Atanasovski V., Risteski A. A Systematic Literature Review on Blockchain-Based Systems for Academic Certificate Verification // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 64679–64698. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3289598.
16. Mukta R., Martens J., Paik H.-Y., Lu Q., Kanhere S. S. Blockchain-based Verifiable Credential Sharing with Selective Disclosure // *Proc. IEEE 19th Int. Conf. on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*. 2020. P. 959–966. DOI: 10.1109/TrustCom50675.2020.00128.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

**Financing:** The research was performed without external funding.