

УДК 004.03

EDN WYXFEI

## АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**А.А. Шамин**ORCID: 0000-0001-7690-8718 e-mail: [al.shamin@mail.ru](mailto:al.shamin@mail.ru)Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Нижегородская область, Россия*

Представлена стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики как сложной программно-интенсивной информационной системы. Обосновывается необходимость многоуровневого описания цифровых систем на основе теории иерархических систем Месаровича, Мако и Такахары. Выделены два блока страт: инфраструктурные (физические источники данных, сети, облачно-туманные вычисления) и предметно-ориентированные (управление данными, цифровые платформы, экосистемы, рынки). Особое внимание уделено роли метаданных как основе структурирования цифровой информации и обеспечения совместимости компонентов. Дополнительно рассматриваются послойная и эшелонированная модели цифровой экономики, отражающие уровни принятия решений и управления соответственно. Показано, что архитектурный подход обеспечивает системность, масштабируемость и устойчивость цифровой трансформации. Работа представляет интерес для исследователей, разработчиков архитектур цифровых систем и государственных регуляторов.

**Ключевые слова:** архитектура цифровой экономики; киберпространство; метаданные; послойное описание; стратификация; цифровая трансформация; цифровая экономика; цифровые платформы; эталонные модели; эшелоны управления.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шамин, А.А. Архитектурные основы цифровой трансформации сложных систем // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 30-39. EDN: WYXFEI

## ARCHITECTURAL FOUNDATIONS FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF COMPLEX SYSTEMS

**A.A. Shamin**ORCID: 0000-0001-7690-8718 e-mail: [al.shamin@mail.ru](mailto:al.shamin@mail.ru)Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**Abstract.** The article presents a stratified architectural model of the digital economy as a complex, software-intensive information system. The necessity of a multi-level description of digital systems based on the theory of multi-level hierarchical systems by Mesarovich, Macko and Takahara is substantiated. Two blocks of strata are identified: infrastructural (physical data sources, networks, cloud-fog computing) and domain-oriented (data management, digital platforms, ecosystems, markets). Special attention is given to the role of metadata as the foundation for structuring digital information and ensuring component interoperability. Additionally, layered and echeloned models of the digital economy are discussed, reflecting the levels of decision-making and management, respectively. It is shown that an architectural approach ensures systematization, scalability, and sustainability of digital transformation. The work is of interest to researchers, developers of digital system architectures and government regulators.

**Key words:** architecture of digital economy; cyberspace, metadata; layered description; stratification; digital transformation; digital economy; digital platforms; reference models; management echelons.

**FOR CITATION:** A.A. Shamin. Architectural foundations for digital transformation of complex systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 30-39. EDN: WYXFEI

### Введение

Цифровая экономика представляет собой сложную программно-интенсивную и цифровую информационную систему, в которой данные выступают в качестве нового фактора про-

изводства, а программное обеспечение – как ключевой инструмент трансформации экономических процессов (рис. 1). Ее функционирование невозможно без устойчивой, гибкой и стандартизированной архитектуры, обеспечивающей совместимость, масштабируемость и безопасность взаимодействия миллионов компонентов – от сенсоров интернета вещей до глобальных цифровых платформ [1, 2]. В условиях стремительной цифровизации всех сфер жизни актуализируется задача системного описания архитектуры цифровой экономики, основанного на принципах теории сложных систем, кибернетики и стандартизации информационных процессов [3].



**Рис. 1. Цифровая экономика как сложная система**

**Fig. 1. The digital economy as a complex system**

Одним из ключевых методологических подходов к решению этой задачи является стратифицированное описание, предложенное в работах Месаровича, Мако и Такахары и позволяющее декомпозировать сложность системы на иерархически организованные уровни абстрагирования – страты, слои и эшелоны [4]. В отличие от структурного синтеза, архитектурное проектирование предполагает сохранение независимости языков описания на разных уровнях абстракции [5], что обеспечивает масштабируемость и эволюционируемость системы без полной переработки нижележащих слоев. Такой подход не только упрощает понимание структуры цифровой экономики, но и обеспечивает основу для проектирования открытых, совместимых и устойчивых цифровых экосистем [6].

Цель работы – представить стратифицированную архитектурную модель цифровой экономики как результат архитектурного проектирования, а не структурного синтеза, выделить ее ключевые уровни, проанализировать взаимосвязи между ними и обосновать практическую значимость архитектурного подхода для цифровой трансформации предприятий и государственных систем.

Актуальность данного исследования определяется несколькими факторами. Во-первых, цифровая экономика перестала быть лишь совокупностью технологий и превратилась в социально-техническую реальность, в которой формируются новые формы собственности, труда, обмена и власти. Эта трансформация затрагивает не только рыночные отношения, но и институты государства, образование, культуру и повседневную жизнь. Однако отсутствие единой архитектурной парадигмы приводит к фрагментации цифрового пространства, технологической зависимости и регуляторным разрывам. Во-вторых, рост объемов данных, скорость их обработки и степень алгоритмизации решений требуют новых методологических инструментов, способных описывать динамику цифровых систем на разных уровнях абстракции – от физических сигналов до рыночных стратегий. Традиционные экономические модели, ориентированные на статические равновесия и рациональных агентов, оказываются недостаточными для анализа самоорганизующихся, адаптивных и непредсказуемых цифровых экосистем. В-третьих, стратифицированный подход позволяет преодолеть противоречие между универсальностью цифровых технологий и спецификой предметных областей. Все цифровые системы, будь то медицинская платформа или логистический маркетплейс, используют одни и те же принципы обработки данных, но реализуют их в контексте уникальных бизнес-процессов, норм и целей. Архитектурная модель, разделяющая описание на инфраструктурные и

предметно-ориентированные страты, делает возможным как унификацию технологической базы, так и гибкость прикладного слоя. Кроме того, в условиях геополитической нестабильности и технологического соперничества возрастает роль цифрового суверенитета – способности государства и общества контролировать собственные данные, инфраструктуру и правила цифрового взаимодействия. Реализация суверенитета невозможна без четкого понимания архитектурных зависимостей: какие компоненты могут быть локализованы, какие – стандартизированы, а какие – должны оставаться открытыми для глобального взаимодействия. Именно архитектурный подход позволяет выявить «узкие» места («узлы зависимости») и сформировать стратегию технологической независимости.

Практическая необходимость разработки такой модели продиктована запросами бизнеса и государственного управления. Предприятия сталкиваются с вызовами цифровой трансформации: как интегрировать микросервисы, облачные решения и ИИ-модели в единую архитектуру? Как обеспечить совместимость с внешними платформами при соблюдении требований безопасности? Государству, в свою очередь, требуется инструмент для проектирования цифровых государственных услуг, национальных платформ и регуляторных песочниц, основанных не на технологической моде, а на системных принципах. Стратифицированная модель, предложенная в настоящей работе, отвечает этим запросам, предлагая универсальный язык описания, пригодный как для проектировщиков, так и для регуляторов.

Научная новизна исследования заключается в разработке стратифицированной архитектурной модели цифровой экономики, предназначенной для обеспечения совместимости, масштабируемости и безопасности взаимодействия компонентов цифровых систем. Данная модель позволяет осуществлять декомпозицию сложных цифровых систем на иерархически организованные уровни абстрагирования с сохранением функциональной автономии страт, отличаясь от известных аналогов (OSI/RM, MIC) расширением охвата до социально-экономического уровня (7 страт) при сохранении принципов инкапсуляции интерфейсов.

### Теоретические основы архитектурного описания цифровой экономики

Цифровая экономика обладает фундаментальными свойствами сложных систем: она состоит из большого числа взаимосвязанных компонентов, проявляет эмерджентность и демонстрирует нелинейную динамику [7]. В соответствии с классификацией Герберта Саймона, речь идет о категории очень сложных вероятностных систем, которые не поддаются точному описанию, но могут быть структурированы через иерархические модели [3]. Их архитектурное описание строится на трех взаимодополняющих принципах: открытости, функциональности и многоуровневости. Открытость обеспечивает обмен информацией с внешней средой через стандартизированные интерфейсы (рис. 2). Функциональность позволяет рассматривать систему как «черный ящик», преобразующий входные данные  $X_t$  в выходные  $Y_t$  по правилу  $Y_t = F(X_t)$ . Многоуровневость, в свою очередь, позволяет описывать взаимодействие на разных уровнях абстракции [8-10]. Эти принципы лежат в основе эталонных моделей, таких как ЭМВОС (OSI/RM) и модель MIC, которые задают архитектуру взаимодействия в цифровой среде через строго определенные уровни и интерфейсы [11].

Согласно теории [4], введем семейство страт  $S = \{S_i\}, i = \overline{1,7}$ , где каждая страта  $S_i$  представляет собой отображение  $S_i: X_i \times W_{i-1} \times W_i \rightarrow Y_i$ , где  $X_i$  – пространство локальных входов  $i$ -й страты,  $W_{i-1}$  – пространство обратных связей от нижележащего уровня ( $W_0 = \emptyset, W_7 = \emptyset$ ),  $W_i$  – пространство координирующих воздействий,  $Y_i$  – пространство выходов  $i$ -й страты. На основе анализа свойств цифровых систем предложена семиуровневая стратифицированная модель архитектуры цифровой экономики (рис. 3), которая делится на две группы уровней:

- 1) инфраструктурные страты (1-3): обеспечивают физическую и вычислительную основу цифровой экономики;

- 2) предметно-ориентированные страты (4-7): реализуют экономические функции, рыночные взаимодействия и создание ценности.

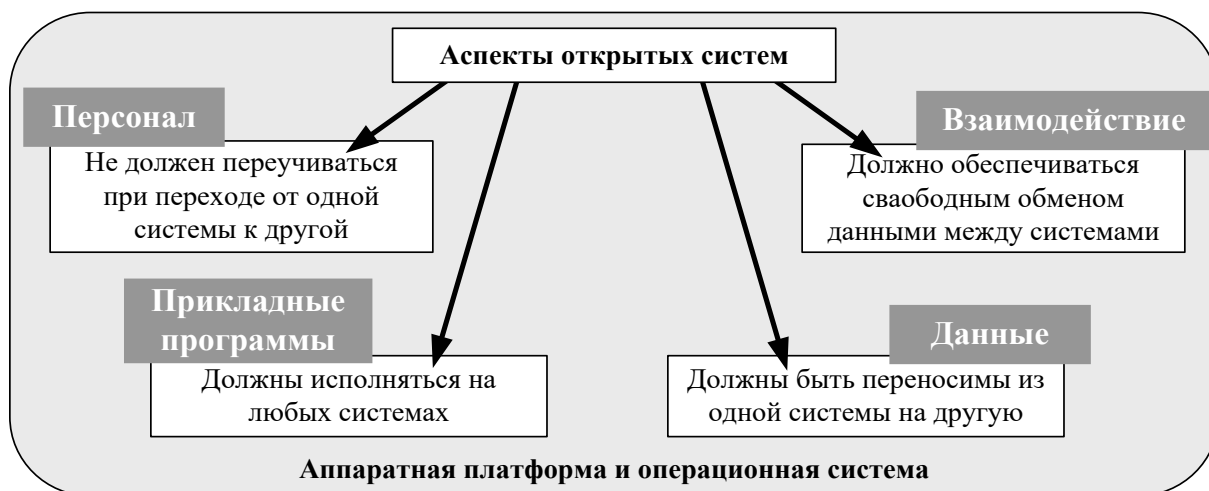


Рис. 2. Аспекты открытости в архитектуре цифровых систем

Fig. 2. Aspects of openness in digital systems architecture



Рис. 3. Стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики

Fig. 3. Stratified architectural model of the digital economy

*Страта 1. Физические законы и источники данных.* Включает технологии аналого-цифрового преобразования, сенсоры, радиотехнические и квантовые системы, формирующие цифровой след реального мира. Здесь реализуется теорема Котельникова, обеспечивающая корректное оцифровывание аналоговых процессов.

$S_1: X_1 \times W_1 \rightarrow Y_1$ , где  $X_1 = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x = f(t), \exists F_x(\omega): F_x(\omega) = 0 \text{ при } |\omega| > \omega_{max}\}$  – пространство аналоговых сигналов с ограниченным спектром,  $W_1 \subseteq \mathbb{R}^m$  – параметры дискретизации,  $Y_1 = \{y_k \mid y_k = x(kT), T < \frac{\pi}{\omega_{max}}\}$  – множество цифровых отсчетов, удовлетворяющих теореме Котельникова,  $S_1(x, w) = \{x(nT_s) \cdot w\}_{n=-\infty}^{\infty}$ , где  $T_s$  – период дискретизации.

*Страта 2. Сети сохранения, распространения и обработки данных.* Охватывает телекоммуникационную инфраструктуру (включая 5G, тактильный интернет, IoT), где данные передаются в виде кадров, пакетов и сегментов с добавлением метаданных для маршрутизации и контроля целостности.

$S_2: X_2 \times W_1 \times W_2 \rightarrow Y_2$ , где  $X_2 = Y_1$  – цифровые отсчеты,  $W_1 = h_1(Y_1)$  – метаданные маршрутизации,  $W_2 \subseteq \mathbb{R}^q$  – параметры качества обслуживания,  $Y_2 = \{(d_j, m_j) \mid d_j \in \{0,1\}^l, m_j \in \{0,1\}^r\}$  – множество пакетов с метаданными,  $S_2(x, w_1, w_2) = \{(f_k(x), g_k(w_1, w_2))\}_{k=1}^N$  – отображение сегментации и добавления метаданных.

*Страта 3. Облачные, туманные и росистые вычисления.* Обеспечивает вертикально распределенную обработку данных, где облако отвечает за централизованную аналитику, туман – за обработку на границе сети, а роса – за автономную работу локальных устройств.

$S_3: X_3 \times W_2 \times W_3 \rightarrow Y_3$ , где  $X_3 = Y_2$  – пакеты данных с метаданными,  $W_2 = Z_2 \times L_2$  – зональные и локальные параметры обработки,  $W_3 \subseteq \mathbb{R}^s$  – глобальные параметры распределения вычислений,  $Y_3 = Y_{\text{облако}} \times Y_{\text{туман}} \times Y_{\text{роса}}$  – результаты обработки на трех уровнях,  $S_3(x, w_2, w_3) = (P_{\text{облако}}(x, h_3(w_3)), P_{\text{туман}}(x, h_2(w_2)), P_{\text{роса}}(x, h_1(w_2)))$  – распределенная обработка.

*Страта 4. Управление данными и их анализ.* Включает хранилища (data lakes), базы данных (SQL/NoSQL), OLAP-системы и методы Data Mining, которые превращают «сырые» данные в информацию и знания.

$S_4: X_4 \times W_3 \times W_4 \rightarrow Y_4$ , где  $X_4 = Y_3$  – распределенные данные,  $W_3 \subseteq \mathcal{M}$  – параметры моделей машинного обучения,  $W_4 \subseteq \mathbb{R}^t$  – параметры семантического описания,  $Y_4 = \mathcal{I} \times \mathcal{K}$  – информация и знания,  $S_4(x, w_3, w_4) = (\phi(x, w_3), \psi(\phi(x, w_3), w_4))$  – преобразование данных в информацию и знания.

*Страта 5. Цифровые платформы и приложения.* Представляет собой виртуальные среды для координации взаимодействия производителей и потребителей, основанные на принципах ХааS («все как сервис») и открытых API.

$S_5: X_5 \times W_4 \times W_5 \rightarrow Y_5$ , где  $X_5 = Y_4$  – информация и знания,  $W_4 \subseteq \mathcal{B}$  – бизнес-правила,  $W_5 = \{API_i\}_{i=1}^k$  – спецификации интерфейсов,  $Y_5 = \{S_j \mid S_j: \mathcal{D}_j \rightarrow \mathcal{R}_j, j = 1, \dots, m\}$  – множество сервисов,  $S_5(x, w_4, w_5) = \{f_j(x, w_4, w_5)\}_{j=1}^m$  – реализация принципа ХааS.

*Страта 6. Экосистема цифровых платформ.* Обеспечивает межплатформенное взаимодействие через «цифровой кодекс», стандарты и соглашения о совместимости.

$S_6: X_6 \times W_5 \times W_6 \rightarrow Y_6$ , где  $X_6 = Y_5$  – сервисы разных платформ,  $W_5 \subseteq \mathcal{C}$  – «цифровой кодекс» совместимости,  $W_6 \subseteq \mathbb{R}^u$  – параметры координации,  $Y_6 = \{(p_i, p_j, v_{ij}) \mid i, j \in I, v_{ij} \in \mathcal{V}\}$  – множество взаимодействий между платформами,  $S_6(x, w_5, w_6) = \cup_{i,j} \{(p_i, p_j, \theta(x_i, x_j, w_5, w_6))\}$  – межплатформенная координация.

*Страта 7. Цифровые рынки и модели деятельности.* Формирует новые бизнес-модели (например, B2C-рынки с объемом свыше \$100 млрд), где посредники заменяются алгоритмическим управлением.

$S_7: X_7 \times W_6 \rightarrow Y_7$ , где  $X_7 = Y_6$  – взаимодействия между платформами,  $W_6 \subseteq \mathcal{A}$  – алгоритмы управления рынками,  $Y_7 = \{(M_k, V_k) \mid k \in K, V_k > 10^{11}\}$  – бизнес-модели с объемами рынков,  $S_7(x, w_6) = \{(B_k(x, w_6), V(B_k))\}_{k=1}^l$  – формирование новых рыночных моделей.

Страты связаны между собой через информационные функции  $h_i: Y_i \rightarrow W_{i+1}$  распределительные функции  $c_i: Y_i \rightarrow M_{i+1}$ , обеспечивающие согласованность между уровнями, где  $M_i$  – множество модифицированных локальных целей для страты  $i$ .

Для всей системы  $S$  выполняется свойство полной стратификации:

$$\forall i, 1 \leq i \leq 7, \forall x \in X, y = S(x) \Rightarrow h_i(S_i(x_i, w_{i-1}, w_i)) = w_{i+1},$$

$$c_i(S_i(x_i, w_{i-1}, w_i)) = m_{i+1}.$$

Представленная стратификация, основанная на работах Месаровича, позволяет не только теоретически обосновать архитектурные решения, но и практически реализовать проектирование масштабируемых цифровых экосистем с предсказуемым поведением на каждом уровне абстракции.

### Метаданные как основа структурирования цифровой информации

Центральным технологическим приемом в архитектуре цифровой экономики является использование метаданных – данных о данных, которые обеспечивают идентификацию, поиск, интерпретацию и интеграцию цифровых ресурсов. Без метаданных цифровые блоки теряют контекст и становятся бесполезными для анализа.

На глобальном уровне применяются стандарты, такие как «Дублинское ядро» (Dublin Core), содержащее 15 базовых элементов описания ресурсов (автор, тема, формат и др.). На локальном уровне метаданные встраиваются непосредственно в структуру блоков данных – от секторов жесткого диска до IP-пакетов (рис. 4).

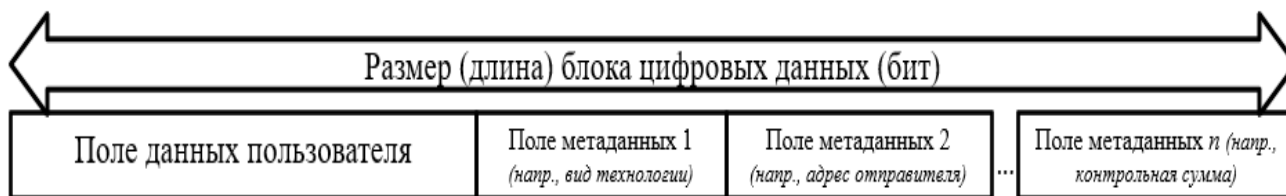


Рис. 4. Структура цифрового блока данных: данные и метаданные

Fig. 4. Digital data block structure: data and metadata

Метаданные не просто сопровождают цифровой блок данных, они формируют его информационную идентичность в киберпространстве. В рамках стратифицированной архитектуры цифровой экономики метаданные выполняют три взаимосвязанные функции, обеспечивающие целостность и смысловую насыщенность цифрового блока данных. Во-первых, они описывают структуру блока данных, указывая его формат, размер, тип кодировки, порядок следования полей, наличие контрольных сумм и другие технические характеристики, необходимые для корректной обработки на соответствующей страте архитектуры. Во-вторых, метаданные обеспечивают семантическое наполнение, фиксируя смысл данных: к какому объекту или явлению они относятся, в каком контексте были получены, какие единицы измерения используются и какова степень их достоверности. В-третьих, метаданные содержат информацию о пространственно-сетевой привязке блока данных в киберпространстве – включая IP-адрес источника, временную метку создания, идентификатор устройства, географические координаты, а также принадлежность к определенному цифровому потоку или транзакции. В совокупности эти три аспекта формируют информационную идентичность цифрового ресурса, делая его управляемым, интерпретируемым и локализуемым в распределенной цифровой среде. Без такой триады – структура, смысл, местоположение – данные теряют статус управляемого информационного ресурса и превращаются в неструктурированный цифровой «мусор», не подлежащий аналитической обработке или интеграции.

Указанный принцип особенно критичен на стыке инфраструктурных и предметно-ориентированных страт: именно метаданные обеспечивают преемственность между физическим уровнем (где фиксируется сигнал) и семантическим уровнем (где данные обретают экономическое или социальное значение).

### Эшелонированная и послонная модели управления цифровой экономикой

Помимо стратификации, архитектура цифровой экономики описывается через слои (уровни принятия решений) и эшелоны (уровни управления). В рамках государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» выделяются три эшелона (рис. 5).



Рис. 5. Эшелонированная модель управления цифровой трансформацией

Fig. 5. Echeloned model of digital transformation management

Пусть  $\mathcal{E} = \{E_i\}_{i=1}^3$  представляет собой эшелонированную систему управления цифровой экономикой, где каждый эшелон определен как управляемая подсистема с собственным пространством решений  $D_i$ , целевой функцией  $G_i$  и полномочиями  $A_i$ :

$$E_i = (D_i, G_i, A_i, \Phi_i),$$

где  $\Phi_i: D_i \times I_i \rightarrow D_{i-1}$  – функция передачи управляющих воздействий на нижестоящий уровень, а  $I_i$  – информационное множество входных данных эшелона.

Эшелоны организованы в иерархию приоритета действий с отношением строгого порядка  $>$ , где  $E_i > E_j$  означает приоритет действий эшелона  $E_i$  над  $E_j$  при  $i < j$ :  $E_1 > E_2 > E_3$ .

*Эшелон 1.* Технологическая среда (разработка сквозных технологий):  $E_1 = (D_1, G_1, A_1, \Phi_1)$ , где  $D_1$  – множество решений по разработке сквозных цифровых технологий,  $G_1 = \max\{T(d): d \in D_1\}$  – максимизация технологической «прорывности»,  $A_1 = \{\text{государственное финансирование, стандарты, НИОКР}\}$ .

*Эшелон 2.* Социальная среда (правовое регулирование, образование, безопасность):  $E_2 = (D_2, G_2, A_2, \Phi_2)$ , где  $D_2$  – множество решений по формированию правовой и социальной среды,  $G_2 = \max\{S(d, E_1(d)): d \in D_2\}$  – максимизация социальной устойчивости при заданных технологиях,  $A_2 = \{\text{законодательство, образование, кибербезопасность}\}$ .

*Эшелон 3.* Рынки и отрасли (инициативная цифровизация бизнеса):  $E_3 = (D_3, G_3, A_3, \Phi_3)$ , где  $D_3$  – множество бизнес-решений по цифровизации рынков и отраслей,  $G_3 = \max\{V(d, E_1(E_2^{-1}(d))), d \in D_3\}$  – максимизация экономической ценности при заданных технологических и социальных условиях,  $A_3 = \{\text{инвестиции, бизнес-модели, конкурентные стратегии}\}$ .

Координация между эшелонами осуществляется через функцию обратной связи  $\Psi: \bigcup_{i=1}^3 D_i \rightarrow \mathbb{R}^m$ , которая обеспечивает согласованность целей:

$$\Psi(d_1, d_2, d_3) = \lambda_1 G_1(d_1) + \lambda_2 G_2(d_2, d_1) + \lambda_3 G_3(d_3, d_1, d_2),$$









где  $\lambda_i$  – весовые коэффициенты значимости каждого эшелона.

Послойный подход применяется, например, в медицине (рис. 6), где услуги строятся от базовых процедур к персонализированному уходу, или в вычислениях – от росы к облаку.

### Обсуждение

Предложенная семиуровневая стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики представляет собой не просто концептуальную схему, а методологическую основу

для системного описания и проектирования сложных цифровых экосистем. В отличие от чисто технологических или управленческих подходов, данная модель объединяет инфраструктурную, информационную, платформенную и социально-экономическую реальности в единую иерархическую структуру, где каждый уровень (страта) имеет четкое функциональное назначение и автономию описания.

УЧАСТНИК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГИ	ВКЛАД В КЛИЕНТОЦЕНТРИЧНОСТЬ
 Государственная Дума РФ  Правительство РФ	Установление прав и обязанностей врача и больного
 Министерство здравоохранения РФ	Определение, кому, от чего и как лечить данное заболевание
 Министерство финансов РФ	Финансирование лечения за счет бюджета
 Департамент здравоохранения региона	Предоставление лечения того вида, которое необходимо больному
 Департамент информатизации региона	Электронная запись к врачу
 Администрация государственного учреждения здравоохранения (больницы, поликлиники)	Предоставление квалифицированных специалистов, установление удобного графика работы
 Врач	Внимательное отношение к больному, желание помочь, использование всех имеющихся знаний и навыков

Слои иерархии, объединяющие функциональные задачи

**Рис. 6. Пример послойного описания цифровой трансформации в здравоохранении**

**Fig. 6. An example of a layered description of digital transformation in healthcare**

Стратификация – это не произвольное деление, а следствие фундаментальных свойств сложных систем, описанных в работах Месаровича, Мако и Такахары. Принцип независимости языков описания на разных стратах позволяет избежать двух крайностей: избыточной детализации, затрудняющей управление, и чрезмерной абстракции, лишаящей модель практической применимости. Например, разработчик облачной инфраструктуры (страта 3) может не знать специфики бизнес-модели B2C-маркетплейса (страта 7), но благодаря стандартизированным интерфейсам и метаданным эти уровни взаимодействуют прозрачно и предсказуемо. Сопоставление с классическими эталонными моделями, такими как OSI/RM или MIC, показывает, что предложенная архитектура является их логическим развитием, адаптированным к условиям цифровой экономики. Если OSI описывает взаимодействие в телекоммуникационных системах, а MIC – в программных компонентах, то представленная в настоящей работе модель охватывает всю цепочку создания ценности – от физического источника данных до глобального цифрового рынка. При этом сохраняется ключевой принцип эталонных моделей: инкапсуляция и стандартизация интерфейсов между уровнями.

Особое значение обретает концепция метаданных как «клея», связывающего разнородные уровни. Без метаданных цифровые блоки теряют контекст и становятся бесполезными для анализа и принятия решений. В этом смысле метаданные выступают не просто техническим элементом, а архитектурной основой совместимости, обеспечивая семантическую согласованность между инфраструктурой и бизнес-процессами. Введение дополнительных измерений – слоев (уровней принятия решений) и эшелонов (уровней управления) – позволяет адаптировать архитектурное описание к реальным условиям функционирования цифровой экономики.

Например, трехэшелонная модель (технологическая среда – социальная среда – рынки и отрасли), заимствованная из государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», демонстрирует, как архитектурный подход может быть инструментом публичной политики, обеспечивающим согласованность усилий государства, бизнеса и общества.

Тем не менее, разработанная модель имеет ограничения. Во-первых, она предполагает иерархическую стабильность, тогда как реальные цифровые экосистемы часто демонстрируют сетевые, децентрализованные или даже хаотические структуры (например, децентрализованные финансы – DeFi). Во-вторых, модель акцентирует внимание на структурной и функциональной сторонах, в меньшей степени затрагивая этические, культурные и когнитивные аспекты цифровой трансформации (например, цифровую усталость, информационные «пузыри», алгоритмическую предвзятость).

Архитектурная четкость делает модель особенно востребованной на этапе цифровой трансформации предприятий и государственных систем. Последовательное движение от анализа бизнес-процессов к выбору цифровой платформы и проектированию ИТ-инфраструктуры напрямую опирается на стратифицированное понимание цифровой экономики. Это позволяет избежать типичных ошибок трансформации: закупки технологий «впрок», игнорирования данных как стратегического актива или конфликта между унаследованными и новыми системами.

Предложенная модель не претендует на исчерпывающее описание цифровой экономики, но обеспечивает методологически устойчивый каркас, в рамках которого могут развиваться как технологические решения, так и управленческие и регуляторные стратегии. Ее главная ценность – в том, что она делает сложность управляемой, превращая цифровую трансформацию из хаотического процесса в осознанное архитектурное проектирование.

### Заключение

Архитектура цифровой экономики – не статическая схема, а динамическая, многоуровневая структура, построенная на принципах стратификации, открытости и стандартизации. Предложенная семиуровневая модель позволяет системно подходить к проектированию цифровых экосистем, обеспечивая совместимость между физическими, информационными и социально-экономическими компонентами. Ключевую роль в этой архитектуре играют метаданные, которые превращают неструктурированные данные в управляемые информационные ресурсы, а также эталонные модели (OSI, MIC, DIKW), задающие язык описания сложных взаимодействий. Практическая реализация архитектурного подхода возможна через цифровую трансформацию предприятий, основанную на выборе подходящей цифровой платформы, формировании современного портфеля приложений и развитии ИТ-инфраструктуры, совместимой с киберпространством.

Будущее цифровой экономики зависит не от скорости внедрения отдельных технологий, а от целостности и устойчивости ее архитектуры, спроектированной с учетом системной сложности, этических норм и стратегических целей развития общества.

### Библиографический список

1. **Колбанёв, М.О.** Сетевая архитектура цифровой экономики / М.О. Колбанёв, Н.А. Верзун, А.В. Омелян. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2018. – 156 с.
2. **Глазьев, С.Ю.** Теория долгосрочного технико-экономического развития / С.Ю. Глазьев. – М.: Владар, 1993. – 310 с.
3. **Саймон, Г.** Науки об искусственном / Г. Саймон. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 142 с.
4. **Месарович, М.** Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
5. **Соснин, П.И.** Архитектурное моделирование автоматизированных систем / П.И. Соснин. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 147 с.

6. **Верзун, Н.А.** Технологическая платформа четвертой промышленной революции / Н.А. Верзун, М.О. Колбанёв, Т.М. Татарникова // Геополитика и безопасность. – 2016. – № 2 (34). – С. 73-77.
7. **Bertalanffy, L. von.** General System Theory / L. von Bertalanffy. – New York: George Braziller, 1968.
8. **Кожанов, Ю.Ф.** Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения / Ю.Ф. Кожанов, М.О. Колбанёв. – СПб.: ГУАП, 2009. – 258 с.
9. **Колбанёв, М.О.** Модель информационного взаимодействия для предприятий сервиса / М.О. Колбанёв, Т.М. Татарникова, С.Ю. Микадзе // Приборостроение. – 2014. – № 9. – С. 10-14.
10. **Верзун, Н.А.** Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks / Н.А. Верзун, М.О. Колбанёв, А.В. Омелян. – СПб.: СПбГЭУ, 2016. – 51 с.
11. **ISO/IEC 7498-1:1994.** Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model. – 1994.

### References

1. Kolbanev M.O., Verzun N.A., Omel'yan A.V. Setevaya arkhitektura tsifrovoy ekonomiki [Network architecture of the digital economy]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGGEU; 2018. 156 p. (in Russian).
2. Glaz'ev S.Yu. Teoriya dolgosrochnogo tekhniko-ekonomicheskogo razvitiya [Theory of long-term technical and economic development]. Moscow: VlaDar; 1993. 310 p. (in Russian).
3. Saymon G. Nauki ob iskusstvennom [The sciences of the artificial]. Moscow: Editorial URSS; 2004. 142 p. (in Russian).
4. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh system [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir; 1973. 344 p. (in Russian).
5. Sosnin P.I. Arkhitekturnoe modelirovanie avtomatizirovannykh system [Architectural modeling of automated systems: a textbook]. Ul'yanovsk: UIGTU; 2008. 147 p. (in Russian).
6. Verzun N.A., Kolbanëv M.O., Tatarnikova T.M. Tekhnologicheskaya platforma chetvertoy promyshlennoy revolyutsii [Technological platform of the fourth industrial revolution]. *Geopolitika i bezopasnost'* [Geopolitics and Security]. 2016;(2(34)):73-77. (in Russian).
7. Bertalanffy L. von. General System Theory. New York: George Braziller; 1968.
8. Kozhanov Yu.F., Kolbanëv M.O. Interfeysy i protokoly setey sleduyushchego pokoleniya [Interfaces and protocols of next generation networks]. Saint Petersburg: GUAP; 2009. 258 p. (in Russian).
9. Kolbanëv M.O., Tatarnikova T.M., Mikadze S.Yu. Model' informatsionnogo vzaimodeystviya dlya predpriyatiy servisa [Model of information interaction for service enterprises]. *Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2014;(9):10-14. (in Russian).
10. Verzun N.A., Kolbanëv M.O., Omel'yan A.V. Vvedenie v infokommunikatsionnye tekhnologii i seti Future Networks [Introduction to infocommunication technologies and Future Networks]. Saint Petersburg: SPbGGEU; 2016. 51 p. (in Russian).
11. ISO/IEC 7498-1:1994. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model. 1994.

*Дата поступления  
в редакцию: 08.12.2025*

*Дата принятия  
к публикации: 26.03.2026*