

УДК 339.92
DOI 10.17513/fr.43949

ПРОЦЕССОРЫ LOONGSON ДЛЯ ЭКОСИСТЕМЫ «ЦИФРОВОГО ШЕЛКОВОГО ПУТИ»: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НЕЗАВИСИМОСТЬ КНР И ПОТЕНЦИАЛ МЕЖДУНАРОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

¹Часовиков М.А. ORCID ID 0009-0002-4544-2737,

¹Рубинская Э.Д. ORCID ID 0000-0002-7876-4057,

¹Болаев А.В. ORCID ID 0000-0003-0795-7115,

²Бизенков К.А. ORCID ID 0009-0006-8163-9456

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», Ростов-на-Дону, Российской Федерации, e-mail: arasha.bolaev@mail.ru;

²Автономная некоммерческая организация Академия Естествознания, Москва, Российской Федерации

В статье анализируются экономически обоснованные условия международного распространения китайской аппаратной платформы Loongson на архитектуре LoongArch в контексте инициативы «Цифровой шелковый путь». Цель исследования – определить, при каких условиях переход на альтернативную архитектуру системы команд может быть экономически оправдан в проектах цифровой инфраструктуры. Проведен анализ открытых спецификаций процессоров LS3A5000, LS3A6000, LS3C5000 и серверного решения 3D5000; сопоставление ключевых параметров; анализ независимых свидетельств зрелости программной экосистемы (наличие поддержки LoongArch в ядре Linux, а также в проектах GCC, glibc и QEMU). Для экономической интерпретации предложена матрица факторов международного распространения платформенных технологий, включающая сетевые эффекты, издержки перехода, совокупную стоимость владения и институциональную поддержку. Показано, как матрица может быть операционализирована через измеримые индикаторы: состояние экосистемы, трудоемкость портирования, а также регуляторные и контрактные ограничения. Сделан вывод, что наибольший потенциал связан со сценариями, в которых заказчик контролирует программную платформу и опирается на программное обеспечение с открытым исходным кодом; напротив, высокая доля критичного проприетарного программного обеспечения и режимы экспортного контроля повышают барьеры технологической привязки и сужают область применимости.

Ключевые слова: процессоры Loongson, архитектура LoongArch, Один пояс и один путь, Цифровой шелковый путь, международное распространение технологий, сетевые эффекты, издержки перехода, совокупная стоимость владения, экспортный контроль

LOONGSON PROCESSORS FOR THE DIGITAL SILK ROAD ECOSYSTEM: TECHNOLOGICAL INDEPENDENCE OF THE PRC AND POTENTIAL FOR INTERNATIONAL DISTRIBUTION

¹Chasovikov M.A. ORCID ID 0009-0002-4544-2737,

¹Rubinskaya E.D. ORCID ID 0000-0002-7876-4057,

¹Bolaev A.V. ORCID ID 0000-0003-0795-7115,

²Bizenkov K.A. ORCID ID 0009-0006-8163-9456

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Rostov State University of Economics (RINH)”, Rostov-on-Don,
Russian Federation, e-mail: arasha.bolaev@mail.ru;

²Autonomous non-profit organization Academy of Natural Sciences, Moscow, Russian Federation

The article analyzes the economically justified conditions for the international distribution of the Chinese Loongson hardware platform based on the LoongArch architecture in the context of the Digital Silk Road initiative. The purpose of the study is to determine under what conditions the transition to an alternative instruction set architecture can be economically justified in digital infrastructure projects. Materials and methods: analysis of the open specifications of the LS3A5000, LS3A6000, LS3C5000 processors and the 3D5000 server solution; comparison of key parameters; analysis of independent evidence of the maturity of the software ecosystem (the presence of LoongArch support in the Linux kernel, as well as in the GCC, glibc, and QEMU projects). For economic interpretation, a matrix of factors for the international distribution of platform technologies is proposed, including network effects, transition costs, total cost of ownership, and institutional support. We show how the matrix can be operationalized through measurable indicators: ecosystem status, porting effort, and regulatory and contractual constraints. It is concluded that the greatest potential is associated with scenarios in which the customer controls the software platform and relies on open source software; conversely, a high proportion of critical proprietary software and export control regimes increase the barriers to technological lock-in and narrow the scope of applicability.

Keywords: Loongson processors, LoongArch architecture, Belt and Road Initiative, Digital Silk Road, international technology diffusion, network effects, transition costs, total cost of ownership, export controls

Введение

В условиях усиления конкуренции в сфере высокопроизводительных вычислений и нарастания технологических ограничений значимость национальных аппаратных платформ возрастает не только как научно-технический, но и как экономический фактор. Для международных проектов цифровой инфраструктуры ключевым становится вопрос о том, в каких институциональных режимах и при каких экономических параметрах альтернативные платформы способны преодолеть инерцию существующих стандартов и экосистем.

В документах инициативы «Один пояс и один путь» одним из направлений обозначено развитие связности и инфраструктуры, включая цифровые компоненты [1]. В научной литературе Цифровой шелковый путь (ЦШП) рассматривается как механизм наращивания присутствия КНР в цифровой инфраструктуре стран-партнеров, в том числе через оборудование, программное обеспечение и инвестиционно-институциональные инструменты [2; 3]. На этом фоне аппаратные платформы (процессоры, серверы и связанная программная экосистема) становятся важным звеном цепочек создания стоимости и инструментом обеспечения цифрового суверенитета.

В зарубежных исследованиях ЦШП трактуется неоднородно: от обобщающего политического лозунга до совокупности проектов цифровой связности и платформенных решений (магистральные сети, центры обработки данных/облачная инфраструктура, цифровые сервисы) [4–6]. В мировой экономической литературе особое внимание уделяется геоэкономике технических стандартов и борьбе за влияние на процедуры их формирования: стандарты совместимости и связанные с ними экосистемы закрепляют долгосрочные траектории рынков и перераспределяют экономические выгоды между участниками [7; 8]. Наконец, влияние экспортного контроля и санкционных режимов на технологическое распространение может проявляться через узлы контроля в глобальных сетях взаимозависимости, что требует учитывать риски несоответствия требованиям в проектной экономике ЦШП [10].

Цель исследования – уточнить экономически обоснованные условия международного распространения аппаратной платформы Loongson на архитектуре LoongArch в рамках проектов ЦШП, разделив технические характеристики как входные параметры, экономические механизмы распространения – как модель объяснения, институциональные ограничения – как внешние условия.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1) систематизировать технические параметры ключевых процессоров Loongson и их позиционирование по сегментам;

2) предложить рамку (матрицу факторов) распространения платформы, включающую сетевые эффекты, издержки перехода, совокупную стоимость владения и институциональную поддержку;

3) показать, как указанная рамка позволяет оценить коридор возможностей внедрения альтернативной архитектуры набора команд в ЦШП-проектах с учетом экспортного контроля и ограничений, связанных с включением в перечень организаций.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на анализе открытых спецификаций и описаний продуктов Loongson (как первичных данных производителя), сопоставлении ключевых параметров (ядра, частоты, кэш, память, публикуемые бенчмарки), а также на построении экономической рамки распространения платформенных технологий на базе теории сетевых внешних эффектов и совместимости [14], моделей конкуренции при издержках переключения и эффектах привязки к поставщику платформы [15] и подхода совокупной стоимости владения (CCB) [16]. Дополнительно проанализированы институциональные ограничения международного обмена технологиями по документам экспортного контроля и перечням организаций [27].

Отдельно учитывается качество экосистемы как фактор, опосредующий сетевые эффекты: наличие основной ветви исходного кода-поддержки архитектуры в ключевых элементах программной платформы (ядро операционной системы, компиляторы, системные библиотеки, виртуализация). Для подтверждения используются независимые источники и официальная документация проектов свободного программного обеспечения [18–20].

Результаты исследования и их обсуждение

В данном разделе технические характеристики рассматриваются исключительно как исходные параметры экономической модели: они отражают уровень производительности и функциональную пригодность платформы для различных сегментов, однако сами по себе не предопределяют успешность ее международного распространения. Источниками данных выступают открытые спецификации производителя и рецензируемые публикации по архитектуре LoongArch.

Таблица 1

Ключевые характеристики процессоров Loongson

| Модель | Сегмент/назначение | Число ядер | Частота | Кэш третьего уровня | Память |
|------------------------------------|--|-----------------|-------------|---------------------|---|
| LS3A5000 | ПК, серверы и другие ИТ-сегменты | 4 | 2,3–2,5 ГГц | 16 МБ | 2×DDR4-3200, поддержка коррекции ошибок |
| LS3A6000 | Встраиваемые системы / настольные ПК / серверы | 4 физ. / 8 лог. | 2,0–2,5 ГГц | 16 МБ | 2×DDR4-3200, поддержка коррекции ошибок |
| LS3A6000 (промышленное исполнение) | Промышленный / встраиваемый сегмент | 4 физ. / 8 лог. | 2,0 ГГц | 16 МБ | 2×DDR4-3200, поддержка коррекции ошибок |
| LS3C5000 | Серверный сегмент | 16 | 2,0–2,2 ГГц | 32 МБ | 4×DDR4-3200, поддержка коррекции ошибок |
| Loongson 3D5000 | Серверный сегмент (многопроцессорные конфигурации) | 32 | ≥ 2,0 ГГц | 64 МБ | 8×DDR4-3200, поддержка коррекции ошибок |

Примечание: составлена авторами по данным Loongson [22–26] и рецензируемой публикации по архитектуре набора команд LoongArch [13]. Число ядер LS3A5000 приведено по официальной карточке продукта (кит.) [22]; показатели SPEC CPU2006 для LS3A6000 – по странице LS3A6000 [23]; для LS3A6000 (промышленное исполнение) использованы параметры промышленной версии (частота 2,0 ГГц) [24]. Публикуемые показатели производительности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Публикуемые показатели производительности/эффективности (по данным открытых страниц продуктов Loongson)

| Модель | Публикуемые показатели архитектура | Источник |
|------------------------------------|---|---|
| LS3A5000 | SPEC CPU2006 базовый показатель (одно ядро); пропускная способность памяти (пропускная способность); пикивая производительность (ГФлопс) | Страница продукта LS3A5000 [22] |
| LS3A6000 | SPEC CPU2006 базовый показатель (один поток) целочисленные/вещественные (46,1/57,7) – по странице LS3A6000; пикивая производительность (ГФлопс) | Страница продукта LS3A6000 [23] |
| LS3A6000 (промышленное исполнение) | Пикивая производительность (ГФлопс) | Страница продукта LS3A6000 промышленное исполнение [24] |
| LS3C5000 | Публикуемые показатели для многопроцессорных конфигураций и эффективности виртуализации | Страница продукта LS3C5000 [25] |
| 3D5000 (серверное решение) | Публикуемые бенчмарки/метрики, связанные с позиционированием серверного решения | Страница продукта 3D5000 [26] |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

LoongArch позиционируется как собственная архитектура набора команд, реализованная в процессорах Loongson, а для обеспечения совместимости и снижения барьеров перехода развиваются механизмы двоичной трансляции и поддержка программной платформы [13].

Рецензируемые публикации по китайским процессорным разработкам (линейка Godson/Loongson) позволяют использовать сопоставимые категории для анализа эволюции архитектур и ограничений внедрения (в том числе через вопросы совместимости и программной поддержки) [11; 12].

Экономическая интерпретация ключевых технических параметров (табл. 1) для проектной оценки сводится к следующему:

1) число ядер / частота и поддерживающая конфигурация памяти задают плотность вычислений и влияют на требуемое число серверов (капитальные затраты) при заданной нагрузке;

2) поддержка коррекции ошибок и числа каналов памяти важны для классов задач с повышенными требованиями к надежности и производительности памяти, влияя на риск простоев и операционные затраты;

3) зрелость виртуализации/эмулляции и наличие основной ветви исходного кода-поддержки в ключевых компонентах программной платформы определяют потенциальную величину издержек переключения (издержки перехода) и риск технологической привязки к поставщику.

Таким образом, аппаратные характеристики платформы используются как исходные параметры для расчета совокупной стоимости владения и для оценки рисков программной совместимости при внедрении в целевые сценариях.

Отдельно подчеркнем, что готовность экосистемы не может оцениваться только корпоративными заявлениями. Для архитектуры LoongArch фиксируется включение поддержки в основные ветви разработки ряда ключевых проектов свободного программного обеспечения. Так, в GCC 12 отмечено добавление поддержки LoongArch [17]; в официальном объявлении glibc 2.36 зафиксирована поддержка LoongArch для Linux с указанием минимальных требований к binutils, GCC и Linux; в QEMU 7.1 заявлена начальная поддержка LoongArch64 и соответствующих платформ, а также опубликована документация по системной эмуляции LoongArch. Для ядра Linux также отмечается появление начальной поддержки LoongArch в ветке 5.19 [21].

Для платформенных технологий (архитектура набора команд + процессоры + программная платформа) характерны выраженные сетевые эффекты: ценность платформы растет по мере увеличения числа пользователей и комплементарных продуктов (программное обеспечение, сервисы, инструменты разработки) [14]. Сетевые эффекты усиливают зависимость от выбранного стандарта и формируют барьеры привязки к поставщику, особенно при несовместимости и высоких издержках переключения [15].

Экономическое решение о миграции на альтернативную аппаратную платформу рационально рассматривать через совокупную стоимость владения: помимо цены приобретения оборудования учитываются затраты на внедрение, сопровождение, об-

учение персонала, адаптацию/портирование ПО и организационные издержки [16]. Для проектов ЦСП (как инфраструктурных проектов с международным участием) эти компоненты ССВ существенны, поскольку зависят от институциональных требований (стандарты, локализация, требования к безопасности, режимы закупок) и от зрелости экосистемы.

Практическая оценка области экономически обоснованной применимости предполагает перевод факторов, представленных в табл. 3, в проектные индикаторы (инвентаризация ПО, оценка трудоемкости портирования, требования соблюдения требований и т.п.) и фиксацию границ применимости модели: она ориентирована на инфраструктурные проекты, где заказчик контролирует программную платформу и может планировать миграцию. Для прикладной оценки экономической целесообразности проектов цифровой инфраструктуры в рамках ЦСП целесообразно переходить от сравнения паспортных технических характеристик к оценке совокупной стоимости владения на горизонте жизненного цикла. В общем виде ССВ может быть представлена как сумма капитальных затрат (капитальные затраты), операционных затрат (операционные затраты) и переходных/транзакционных издержек (портирование, миграция, обучение и т.п.) [16]. Ниже приведен минимальный качественный шаблон структуры затрат для типового инфраструктурного проекта (например, развертывания прикладной платформы/ЦОД), который используется как чек-лист при сборе данных для расчета (табл. 4).

Для высокотехнологичных продуктов международное распространение определяется не только рыночными механизмами, но и режимами экспортного контроля. В частности, в официальном документе Бюро промышленности и безопасности Министерства торговли США зафиксировано добавление Loongson Technology в перечень организаций (действие нормы – с 2 марта 2023 г.), что означает усиление лицензионных требований к поставкам товаров, подпадающих под действие Правил экспортного администрирования США, при участии указанного субъекта [27].

С точки зрения экономической модели распространения это выступает внешним условием, которое влияет на ожидаемые издержки и риски: а) для самой компании-производителя – через доступность производственных и проектных цепочек; б) для потенциальных партнеров и заказчиков – через юридические риски, требования к соблюдению регуляторных требований, а также через неопределенность долгосрочной поддержки.

Таблица 3

**Операционализация факторов международного распространения аппаратной платформы
(подход к оценке области экономически обоснованной применимости)**

| Уровень / роль в анализе | Фактор / механизм | Операциональные индикаторы (как измерять) и источники данных | Интерпретация для области и границы применимости |
|--|---|--|--|
| (а) Технические данные | Производительность / функциональная пригодность платформы | Паспортные параметры (ядра, частоты, кэш, память) и публикуемыеベンチмарки/метрики производителя; ссылки на страницы продуктов и открытые спецификации | Технические параметры выполняют функцию ограничений реализуемости, задавая диапазон применимости платформы по классам задач. Их наличие или отсутствие не тождественны экономической эффективности и подлежат интерпретации в терминах капитальных и операционных затрат, а также рисков технологической привязки к поставщику |
| (б) Экономическая модель распространения | Сетевые эффекты и комплементарность (экосистемы) | Критерии зрелости программной экосистемы включают наличие поддержки архитектуры системы команд в основной (официальной) ветви разработки ключевых компонентов: компилятора, системной библиотеки, средств виртуализации/эмуляции и ядра операционной системы. Степень зрелости подтверждается по результатным примечаниям и документации соответствующих проектов программного обеспечения с открытым исходным кодом. Дополнительно для проектной оценки целесообразно учитывать дополнительные требования к программной платформе, доступных в основной ветви разработки и в общедоступных репозиториях (в процентах и в абсолютном количестве) | Чем выше покрытие критически важных компонентов программной платформы и предсказуемее траектория основной ветви исходного кода-поддержки, тем шире область применимости. Граница применимости: подход релевантен прежде всего для инфраструктурных проектов, где програмчная платформа может быть стандартизирована и контролируема заказчиком |
| (б) Экономическая модель распространения | Издержки переключения и привязки к поставщику (портирование, обучение, несовместимость) | Издержки переключения и привязки к поставщику (портирование, обучение, несовместимость) первых, учитывается для критически значимого промышленного программного обеспечения и драйверов, для которых отсутствуют версии под целевую архитектуру системы команд (в процентах и в абсолютном количестве). Во вторых, оценивается число прикладных систем и сервисов, требующих пересборки, доработки или адаптации. | Рост издержек перехода сужает область применимости и повышает риск застравления на промежуточных решениях (эмуляция/гибрид). Граница применимости: проекты с высокой долей промышленного программного обеспечения и жесткими зависимостями от x86/ARM-экосистем обычно выходят за пределы экономически разумного коридора без специальных мер (виртуализация, замена ПО, поддержка вендоров/госпрограмм) |

Окончание табл. 3

| Уровень / роль в анализе | Фактор / механизм | Операциональные индикаторы (как измерять) и источники данных | Интерпретация для области и границы применимости |
|---|--|--|--|
| (б) Экономическая модель распространения | Совокупная стоимость владения и жизненный цикл | CCB-шаблон: капитальные затраты (оборудование, внедрение) + операционные затраты (эксплуатация/поддержка) + переходные/транзакционные издержки (погашение, обучение, сертификация) | Область применимости расширяется, когда издержки перехода и риски совместности окупаются эффектами жизненного цикла, в том числе снижением операционных затрат и рисков доступа к технологиям. Без инвентаризации программного обеспечения и данных, необходимой для расчета совокупной стоимости владения, оценка носит преимущественно качественный характер |
| (в) Институциональная поддержка | Регуляторные и здравоохранительные требования; кадровые компетенции и сертификация | Институциональное подтверждение миграции; требования к локализации и технологическому супервизору; программы обучения; регламентированную сервисную модель сопровождения (уровень обслуживания, 1–3-я линии); обязательные проверки и сертификации (перечень, сроки) по правилам заказчика и страны реализации | При высокой институциональной поддержке барьера перехода снижаются, а область применимости расширяется. При жестком соблюдении регуляторных требований без предусмотренного бюджета / сроков на сертификацию и аудит, область применимости сужается |
| (г) Внешние институциональные условия (международная среда) | Экспортный контроль, санкционные режимы, узлы контроля в сетях поставок | Факт присутствия субъектов/технологий в перечнях ограничений (например, перечень организаций) и правовые последствия для поставок/поддержки | Внешние ограничения увеличивают неопределенность и требования к управлению рисками, влияя на ССВ (страхование, альтернативные источники поставок, соблюдение регуляторных требований). Граница применимости: параметры внешней среды могут доминировать над рыночными факторами и требовать сценарного анализа |

Примечание: составлена авторами на основе источников [14–16].

Таблица 4

Минимальная структура затрат совокупной стоимости владения для типового ЦШП-проекта и параметры для сценарной оценки

| Компонент затрат | Содержание компонента (пример) | Необходимые данные | Интерпретация |
|--|---|--|--|
| Переход/портирование и миграция ПО | Адаптация приложений и библиотек под целевую архитектуру набора команд/ОС; тестирование; исправление ошибок; перенос процессов непрерывной интеграции и поставки; обновление документации | Перечень и критичность приложений; объем кода/зависимостей; трудозатраты по видам работ; требования к сертификации | Ключевой драйвер издержек переключения; целесообразно выделять критический контур и начинать с пилотного сегмента |
| Подготовка и сопровождение среды виртуализации/контейнеризации | Настройка гипервизора/эмulation и/или контейнерной среды; интеграция с orchestration; проверка производительности и безопасности | Выбранная программная платформа (например, KVM/QEMU + контейнеры –при использовании); требования к производительности; число виртуальных машин/контейнеров; трудозатраты на сопровождение | Виртуализация может снижать барьеры миграции, но добавляет требования к компетенциям и тестированию |
| Обучение и развитие компетенций | Обучение администраторов, разработчиков, специалистов информационных баз; создание методических материалов; сертификация/аттестация (если требуется) | Численность персонала по ролям; программа обучения; длительность; стоимость учебных материалов/курсов; затраты рабочего времени | В условиях дефицита компетенций эффект обучения проявляется с лагом; важно учитывать стоимость времени работы команды |
| Эксплуатация и сопровождение | Текущая поддержка (1–3-й линии), обновления, мониторинг, резервное копирование, управление инцидентами; сопровождение прикладных систем | Требования к уровню обслуживания / уровням поддержки; штат и графики дежурств; стоимость сервисных контрактов; частота обновлений; стоимость простоев | Операционные затраты определяют устойчивость; при сопоставимой цене оборудования именно сопровождение часто формирует основную часть ССВ |
| Инфраструктура и оборудование | Закупка/амortизация серверов, системы хранения данных, сетевого оборудования; запасные части; доставка и монтаж; гарантийные обязательства | Спецификация конфигурации; объем вычислительных ресурсов; график закупок; условия гарантии; срок службы; энергопотребление | Важно оценивать ССВ с учетом производительности в целевых нагрузках, а не только пиковых паспортных показателей |
| Программное обеспечение и интеграция | Операционные системы / дистрибутивы, системы управления базами данных, промежуточное программное обеспечение, средства информационной безопасности, мониторинга; интеграция с действующими системами и форматами данных | Список ПО и лицензирования (если применимо); требования по совместимости; объем интеграционных интерфейсов; трудозатраты на интеграцию | Наличие поддерживаемых основной ветви исходного кода –проектов и документации снижает риски и стоимость интеграции |
| Институциональные/регуляторные затраты и риски | Соблюдение регуляторных требований и ограничений: экспортные ограничения, требования локализации, сертификация; юридическое сопровождение | Перечень применимых норм и ограничений; требования заказчика; сроки согласований; затраты на юридическую экспертизу | Внешние условия могут увеличивать стоимость и сроки; важно учитывать сценарии доступности оборудования / программного обеспечения |
| Вывод из эксплуатации и обновление | Миграция данных при обновлениях, утилизация/ списание, замена оборудования, переход на новые версии программного обеспечения | Сроки жизненного цикла; политика обновлений; стоимость миграции данных; требования к сохранности/архивированию | Недооценка затрат на обновление ведет к эффекту ловушки и росту ССВ на поздних стадиях |
| Чувствительность к издержкам перехода (ИП) | Коэффициент $k_{\text{ИП}}$ – мультипликатор базовой оценки издержек перехода: $\text{ИП} = k_{\text{ИП}} \cdot \text{ИП}_{\text{баз}}$ $k_{\text{ИП}} > 1 \text{ -- рост трудоемкости и барьеров}; k_{\text{ИП}} < 1 \text{ -- снижение}$ | Базовая оценка издержек перехода ($\text{ИП}_{\text{баз}}$) формируется по чек-листу (портирование, тестирование, обучение, интеграция) и уточняется с учетом сценария проекта (табл. 5) и доступности альтернатив | Позволяет выполнить сценарный анализ без подстановки цен: достаточно оценить трудоемкость и затраты времени при разных значениях $k_{\text{ИП}}$ (например, при переходе от программной платформы с открытым исходным кодом к proprietарной среде) |

Примечание: составлена авторами на основе источника [16].

Таблица 5**Типовые сценарии проектов ЦПП и ожидаемые драйверы издержек перехода/CCB**

| Сценарий проекта | Типовая программная платформа (пример) | Доля критичного proprietарного программного обеспечения | Издержки перехода | Ожидаемая оценка области применимости (при прочих равных) |
|--|--|--|---|--|
| Государственный сектор / муниципальные сервисы (внутренние информационные системы, реестры) | Программная платформа с открытым исходным кодом (Linux, системы управления базами данных и веб-компоненты, типовые сервисы; управляемый сервер приложений) | Низкая – средняя (при использовании программного обеспечения с открытым исходным кодом и типовых веб-сервисов) | Средняя. Портирование прикладных модулей + обучение администраторов, интеграции с государственными информационными системами / сервисами межведомственного электронного взаимодействия – аналогами (зависит от интерфейсов) | Область применимости относительно широкая при наличии институциональной поддержки и стандартизации программного обеспечения |
| Образование / университетская ИТ-инфраструктура (учебные классы, лаборатории) | Сменяющаяся программная платформа: с открытым исходным кодом + специализированное программное обеспечение; возможна виртуализация старых приложений | Средняя (зависит от специального доли программного обеспечения, требующего x86/Windows) | Средняя – высокая. Ключевым фактором является наличие альтернативного специализированного программному обеспечению либо возможность его пересборки и адаптации под целевую архитектуру; в отдельных случаях допустимо частичное использование эмуляции или виртуализации | Область применимости оценивается как средняя; ключевым условием является предварительная инвентаризация критически значимых производственных приложений и оценка сценариев их замещения либо переноса на целевую архитектуру |
| Центры обработки данных и облачная инфраструктура для типовых развертываний на базе открытого программного обеспечения (облачная инфраструктура, прикладная облачная платформа, контейнерные технологии) | Linux, KVM/QEMU и контейнерные технологии; предоставляет программное обеспечение с открытым исходным кодом | Низкая | Средняя. Основные издержки перехода определяются адаптацией процессов поставки и сопровождения программных компонентов (сборка, тестирование, выпуск), настройкой виртуализации и подготовкой персонала; ключевое значение имеет зрелость экосистемы и наличие поддержки в основной версии разработки | Область применимости широка для нагрузок на базе программного обеспечения с открытым исходным кодом; ограничена для proprietарных гипервизоров и закрытых платформ |
| Телекоммуникационный узел / периферийная инфраструктура (виртуализация сетевых функций, программно определяемые сети) | Платформа на основе Linux с DPDK-ускорением и виртуализацией сетевых функций, взаимосвязь от proprietарных сетевых функций и драйверов | Средняя – высокая | Высокая. Высокая чувствительность к совместимости драйверов и аппаратных ускорителей, а также к требованиям сертификации; требуется адаптация (портирование) сетевых функций | Область применимости ограничена; требуется pilotный проект и предварительная оценка совместимости критически значимых компонентов |

Примечание: оценки носят ориентировочный характер и подлежат уточнению при сборе данных для расчета CCB по табл. 4.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

С учетом представленной матрицы факторов область применимости для ЦШП-проектов можно трактовать как область сочетаний (1) достаточной технической пригодности аппаратной платформы, (2) приемлемых издержек переключения и ССВ на жизненном цикле, (3) достаточной зрелости программной экосистемы и институциональной поддержки (закупочные механизмы, стандарты, подготовка кадров) при заданных внешних ограничениях.

Для платформы Loongson на архитектуре LoongArch технические спецификации указывают на формирование линейки, охватывающей персональные и серверные сценарии, включая многопроцессорные конфигурации (табл. 1). Экосистемный компонент подтверждается наличием основной ветви исходного кода-поддержки в базовых инструментах разработки и виртуализации (GCC, glibc, QEMU), а также появлением поддержки архитектуры в ядре Linux. Это снижает барьеры портирования и повышает предсказуемость технологической траектории, что принципиально важно при сетевых эффектах.

Вместе с тем даже при наличии базовой программной платформы доминирование x86/ARM-экосистем в большинстве международных рынков формирует сильные эффекты привязки к поставщику и высокие издержки перехода для проектов, связанных на специфические проприетарные приложения и цепочки поставок [14; 15]. Следовательно, наиболее реалистичный коридор внедрения альтернативной архитектуры набора команд в ЦШП-проектах находится в сегментах, где (а) набор прикладного ПО контролируем и может быть стандартизирован; (б) критичны требования к технологическому суверенитету и/или к управлению рисками доступа к технологиям; (в) присутствуют институциональные механизмы поддержки перехода (стандартизация, обучение, гарантии долгосрочного сопровождения).

Таким образом, экономическая оценка распространения Loongson на архитектуре LoongArch в рамках ЦШП требует перехода от декларативных формулировок о лидерстве к измеримым параметрам экосистемы и ССВ-логике: наличию поддерживаемой основной ветви исходного кода программной платформы, устойчивости инструментальной цепочки, а также расчету полных издержек внедрения и сопровождения для конкретного типа проекта.

Для минимальной прикладной иллюстрации операционализации области применимости рассмотрим четыре типовых класса инфраструктурных проектов, об-

суждаемых в литературе о ЦШП как о цифровой связности и инфраструктуре (магистральные сети / ЦОД / цифровые сервисы) [1; 6; 9]. Сценарии не подменяют эмпирического расчета, но задают структуру данных для ССВ и показывают, какие компоненты издержки перехода оказываются критичными (табл. 5).

Заключение

В ходе проведенной работы было совмещено три уровня анализа: параметры аппаратной платформы (микроуровень), экономические механизмы распространения платформенных технологий (мезоуровень) и институциональные ограничения международного обмена технологиями (макроуровень) – с последующей интерпретацией результатов применительно к проектной логике ЦШП.

В статье показано, что оценка международного распространения аппаратной платформы Loongson на архитектуре LoongArch в контексте Цифрового шелкового пути должна опираться на разделение уровней анализа: технические характеристики – как входные параметры, экономические механизмы распространения (сетевые эффекты, издержки перехода, ССВ) – как модель, институциональные ограничения – как внешние условия. Такой подход позволяет конкретизировать коридор возможностей для проектов ЦШП и избежать смешения технических и экономико-институциональных аргументов.

Независимые свидетельства развития программной экосистемы (GCC, glibc, QEMU, ядро Linux) указывают на наличие базовых предпосылок для расширения совместимости LoongArch и снижения барьеров портирования. Однако институциональные ограничения экспортного контроля и эффекты привязки к поставщику доминирующих экосистем ограничивают масштабы и темпы международного распространения, что требует проектно-ориентированной экономической оценки и институционального сопровождения.

Список литературы

1. National Development and Reform Commission, Ministry of Foreign Affairs, Ministry of Commerce of the People's Republic of China (with State Council authorization). Vision and Actions on Jointly Building Silk Road Economic Belt and 21st-Century Maritime Silk Road. March 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://english.www.gov.cn/archive/publications/2015/03/30/content_281475080041500.htm (дата обращения: 10.11.2025).
2. Арсентьева И.И. Цифровой шелковый путь КНР: вызовы и возможности для России // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. 2024. Т. 24. № 1. С. 51–64. DOI: 10.22363/2313-0660-2024-24-1-51-64. EDN: EUXXHМ.

3. Wang Y., Gao H., Wang H. The digital silk road and trade growth: New evidence from the belt and road initiative countries // Research in International Business and Finance. 2024. T. 67 (Part B). Article 102140. DOI: 10.1016/j.ribaf.2023.102140.
4. Shen H. Building a Digital Silk Road? Situating the Internet in China's Belt and Road Initiative // International Journal of Communication. 2018. T. 12. P. 2683–2701. URL: https://www.andrew.cmu.edu/user/hongs/files/Silk.Road_IJOC2018.pdf (дата обращения: 10.11.2025).
5. Ly B. Challenge and perspective for Digital Silk Road // Cogent Business & Management. 2020. T. 7 (1). Article 1804180. DOI: 10.1080/23311975.2020.1804180.
6. Cheng J., Zeng J. «Digital Silk Road» as a Slogan Instead of a Grand Strategy // Journal of Contemporary China. 2024. T. 33. Vol. 149. P. 823–838. DOI: 10.1080/10670564.2023.2222269.
7. Rühlig T. Chinese Influence through Technical Standardization Power // Journal of Contemporary China. 2023. T. 32. Vol. 139. P. 54–72. DOI: 10.1080/10670564.2022.2052439.
8. Zúñiga N., Datta Burton S., Blancato F., Carr M. The geopolitics of technology standards: historical context for US, EU and Chinese approaches // International Affairs. 2024. T. 100. Vol. 4. P. 1635–1652. DOI: 10.1093/ia/iae124.
9. UN ESCAP. The Operation of Cross-Border Terrestrial Fibre-Optic Networks in Asia and the Pacific. Working Paper. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unescap.org/resources/operation-cross-border-terrestrial-fibre-optic-networks-asia-and-pacific> (дата обращения: 10.11.2025).
10. Farrell H., Newman A.L. Weaponized Interdependence: How Global Economic Networks Shape State Coercion // International Security. 2019. T. 44. Vol. 1. P. 42–79. DOI: 10.1162/isec_a_00351.
11. Hu W., Zhang Y., Fu J. An introduction to CPU and DSP design in China // Science China Information Sciences. 2016. T. 59. Article 012101. URL: <https://scis.scichina.com/en/2016/012101.pdf> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.1007/s11432-015-5431-6.
12. Fan B.X., Yang L., Wang J.M., Wang R., Xiao B., Xu Y., Liu D., Zhao J.-Y. Physical Implementation of the 1GHz Godson-3 Quad-Core Microprocessor // Journal of Computer Science and Technology. 2010. T. 25. P. 192–199. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11390-010-9316-2> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.1007/s11390-010-9316-2.
13. Hu Weiwu, Wang Wenxiang, Wu Ruiyang, Wang Huandong, Zeng Lu, Xu Chenghua, Gao Xiang, Zhang Fuxin. Loongson Instruction Set Architecture Technology // Journal of Computer Research and Development. 2023. T. 60 (1). C. 2–16. URL: <https://crad.ict.ac.cn/en/article/doi/10.7544/issn1000-1239.202220196> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.7544/issn1000-1239.202220196.
14. Katz M.L., Shapiro C. Network Externalities, Competition, and Compatibility // The American Economic Review. 1985. T. 75 (3). C. 424–440. URL: <https://ideas.repec.org/a/aea/aecrev/v75y1985i3p424-40.html> (дата обращения: 10.11.2025).
15. Farrell J., Klemperer C. Coordination and Lock-in: Competition with Switching Costs and Network Effects // Handbook of Industrial Organization. 2007. T. 3. C. 1967–2072. DOI: 10.1016/S1573-448X(06)03031-7.
16. Ellram L.M. Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. 1995. T. 25 (8). C. 4–23. URL: <https://www.emerald.com/ijpdlm/article/25/8/4/161884/Total-cost-of-ownership-an-analysis-approach-for> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.1108/09600039510099928.
17. GCC 12 Release Series – Changes, New Features, and Fixes (support for LoongArch architecture instruction set has been added). [Электронный ресурс]. URL: <https://gcc.gnu.org/gcc-12/changes.html> (дата обращения: 10.11.2025).
18. The GNU C Library version 2.36 is now available (announcement; support for LoongArch running on Linux). [Электронный ресурс]. URL: <https://lists.gnu.org/archive/html/info-gnu/2022-08/msg00000.html> (дата обращения: 10.11.2025).
19. QEMU 7.1.0 released (initial support for LoongArch64 architecture). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qemu.org/2022/08/30/qemu-7-1-0/> (дата обращения: 10.11.2025).
20. LoongArch System emulator – QEMU documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qemu.org/docs/master/system/target-loongarch.html> (дата обращения: 10.11.2025).
21. Kernel 5.19: Probably the final release of the 5.x series (includes initial support for the LoongArch CPU architecture). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.collabora.com/news-and-blog/news-and-events/kernel-5.19-probably-the-final-release-of-the-5.x-series.html> (дата обращения: 10.11.2025).
22. LS3A5000. официальный сайт Loongson (англ. версия). Кит. карточка продукта (включая число ядер). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loongson.cn/product/show?id=10> (дата обращения: 10.11.2025).
23. LS3A6000. Loongson official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loongson.cn/EN/product/show?id=11> (дата обращения: 10.11.2025).
24. LS3A6000 (промышленное исполнение). Loongson official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loongson.cn/EN/product/show?id=15> (дата обращения: 10.11.2025).
25. LS3C5000. Loongson official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loongson.cn/EN/product/show?id=3> (дата обращения: 10.11.2025).
26. LS3D5000. Loongson official website. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.loongson.cn/product/show?id=21> (дата обращения: 10.11.2025).
27. Additions and Revisions of Entities to the Entity List (Bureau of Industry and Security, U.S. Department of Commerce). Final rule (effective March 2, 2023). [Электронный ресурс]. URL: <https://public-inspection.federalregister.gov/2023-04558.pdf> (дата обращения: 10.11.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.