

УДК 620.9:004.7:338.2

JEL Q48, O38

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПОДХОДОВ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ ДАТА-ЦЕНТРОВ

Ратнер Светлана Валерьевна

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия
ratner-sv@rudn.ru SPIN: 7840-4282; [ORCID: 0000-0003-3485-5595](https://orcid.org/0000-0003-3485-5595)

Иосифов Валерий Викторович

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
iosifov_vv@mail.ru; SPIN: 3558-0754

Минченкова Александра Михайловна

Университет Бернандо О'Хиггинса, Сантьяго, Чили
alexandraminchenko@ubo.cl; [ORCID: 0000-0002-9550-2008](https://orcid.org/0000-0002-9550-2008)

Аннотация: Стремительное развитие искусственного интеллекта и цифровых сервисов приводит к быстрому росту энергопотребления дата-центров и усиливает нагрузку на энергетическую инфраструктуру. Цель исследования — сравнительно оценить подходы к регулированию энергетической эффективности дата-центров в Европейском союзе, Китае, Сингапуре и странах Латинской Америки. На основе качественного контент-анализа и сравнительного анализа нормативных документов, государственных стратегий и отраслевых материалов за 2023–2026 гг. выделены шесть основных направлений регулирования: энергоэффективность, использование возобновляемой энергии, отчетность и мониторинг, управление водными ресурсами, регулирование инфраструктуры и электросетей, а также стимулирование технологических инноваций. Результаты показывают, что выбор регуляторных инструментов определяется прежде всего особенностями энергетических систем, ресурсными ограничениями, климатическими условиями и инфраструктурными возможностями стран. На этой основе выделены четыре модели регулирования: европейская модель, основанная на показателях эффективности; китайская модель стратегического планирования; сингапурская модель технологического отбора; и формирующаяся латиноамериканская модель ресурсной безопасности.

Ключевые слова: дата-центры, энергоэффективность, ресурсоэффективность, регулирование, стандарты

COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL APPROACHES TO ENERGY REGULATION FOR DATA CENTERS

Ratner Svetlana Valeryevna

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
ratner-sv@rudn.ru; SPIN: 7840-4282; [ORCID: 0000-0003-3485-5595](https://orcid.org/0000-0003-3485-5595)

Iosifov Valery Viktorovich

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

iosifov_vv@mail.ru; SPIN: 3558-0754

Minchenkova Alexandra Mikhailovna

Bernardo O'Higgins University, Santiago, Chile

alexandraminchenko@ubo.cl; ORCID: 0000-0002-9550-2008

Abstract: The rapid development of artificial intelligence and digital services is driving a sharp increase in data center energy consumption and placing greater strain on energy infrastructure. This study aims to comparatively assess approaches to regulating data center energy efficiency in the European Union, China, Singapore, and Latin American countries. Based on a qualitative content analysis and a comparative review of regulatory documents, government strategies, and industry materials from 2023–2026, six key regulatory areas were identified: energy efficiency, renewable energy use, reporting and monitoring, water resource management, infrastructure and grid regulation, and the incentivization of technological innovation. The findings indicate that the choice of regulatory instruments is primarily determined by the specific characteristics of national energy systems, resource constraints, climatic conditions, and infrastructure capabilities. On this basis, four regulatory models were identified: the European model based on efficiency metrics; the Chinese model of strategic planning; the Singaporean model of technology selection; and the emerging Latin American model focused on resource security.

Keywords: data centers, energy efficiency, resource efficiency, regulation, standards

Введение. В последние годы стремительное развитие искусственного интеллекта, облачных вычислений и цифровых платформ обусловило беспрецедентный рост мирового рынка дата-центров. Современные центры обработки данных (ЦОД) стали ключевым элементом цифровой экономики, обеспечивая функционирование генеративного искусственного интеллекта, больших данных, электронного государственного управления, финансовых платформ и глобальных облачных сервисов. Однако рост вычислительных мощностей сопровождается увеличением нагрузки на энергетические системы. Согласно оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), совокупное энергопотребление дата-центров, телекоммуникационных сетей и цифровой вычислительной инфраструктуры уже сопоставимо с годовым потреблением электроэнергии крупных промышленно развитых стран и продолжает расти двузначными темпами [1, 2].

Проблема стала особенно актуальной после широкого распространения генеративного искусственного интеллекта, обучение и эксплуатация которого требуют значительно больших вычислительных ресурсов по сравнению с традиционными цифровыми сервисами. В результате ЦОД превращаются не только в драйверы цифровой трансформации экономики, но и в одну из наиболее быстро растущих категорий потребителей электроэнергии. Увеличение нагрузки на национальные энергосистемы, необходимость декарбонизации экономики и обеспечения энергетической безопасности стимулируют правительства к разработке новых механизмов регулирования, направленных на повышение энергетической эффективности цифровой инфраструктуры [3].

Несмотря на общность проблемы, подходы к регулированию существенно различаются. Европейский союз делает акцент на обязательной отчетности, стандартизированных показателях энергоэффективности и прозрачности деятельности операторов [4]. Китай сочетает жесткие нормативные требования с пространственным перераспределением вычислительных мощностей и централизованным государственным планированием [5]. Сингапур использует квотирование новых мощностей и предъявляет исключительно высокие требования к технологической эффективности объектов [6]. В странах Латинской Америки регулирование определяется особенностями национальных энергосистем, дефицитом водных ресурсов и необходимостью поддержания надежности электросетей [7].

Сравнительный анализ этих моделей позволяет выявить инструменты повышения энергетической эффективности ЦОД и определить направления дальнейшего совершенствования государственной политики в условиях быстрого развития цифровой экономики. Цель исследования заключается в сравнительной оценке подходов Европейского союза, Китая, Сингапура и стран Латинской Америки к повышению энергоэффективности дата-центров, а также в выявлении их ключевых характеристик и ограничений.

Материалы и методы. Эмпирическую базу исследования составили официальные нормативные документы, государственные стратегии, политические и отраслевые отчеты, а также аналитические публикации, посвященные повышению энергетической эффективности дата-центров. Рассматривались четыре основные модели регулирования: Европейский союз, Китай, Сингапур и страны Латинской Америки, включая Бразилию, Чили и Мексику. Анализ охватывал наднациональные директивы, национальные законы и нормативные акты, стратегические дорожные карты, технические стандарты, отчеты международных организаций и отраслевые публикации за 2023–2026 гг. [4–15]. Такой подход позволил сопоставить не только законодательные требования, но и практические инструменты регулирования в различных институциональных и энергетических условиях.

Методология сочетает качественный контент-анализ и сравнительный анализ. В ходе контент-анализа были выделены основные регуляторные инструменты, регулирующие энергопотребление ЦОД: обязательные показатели энергоэффективности, требования к возобновляемой энергетике, отчетность и мониторинг, управление водными ресурсами, планирование инфраструктуры, использование избыточного тепла и интеграция с электросетями.

Для обеспечения сопоставимости инструменты были классифицированы по шести направлениям:

1. требования к энергоэффективности;
2. обязательства в сфере возобновляемой энергетики;
3. отчетность и мониторинг;
4. охлаждение и управление водными ресурсами;
5. регулирование инфраструктуры и электросетей;
6. стимулирование технологических инноваций.

Глобальные тенденции энергопотребления дата-центров и формирование политики регулирования. Быстрое распространение искусственного интеллекта, облачных вычислений, цифровых платформ и высокопроизводительных вычислений

превратило дата-центры в одного из наиболее быстро растущих потребителей электроэнергии. По данным Международного энергетического агентства, совокупное потребление электроэнергии дата-центрами, майнингом криптовалют и сетями передачи данных уже превышает 460–500 ТВт·ч в год, что сопоставимо с энергопотреблением крупных промышленно развитых стран. Потребление электроэнергии самими дата-центрами оценивается как растущее примерно на 12–15% в год, причем дальнейшее ускорение ожидается вследствие распространения генеративного ИИ [1].

Распределение энергопотребления между регионами крайне неравномерно. США остаются крупнейшим рынком дата-центров, на который приходится около 45% мирового энергопотребления ЦОД — приблизительно 210–220 ТВт·ч в год. Китай занимает второе место с 120–130 ТВт·ч, или около 25–29% мирового потребления, тогда как на Европу приходится примерно 70–75 ТВт·ч, или около 15% мирового показателя [1]. Одновременно Латинская Америка становится одним из наиболее быстро растущих рынков цифровой инфраструктуры: число коммерческих ЦОД в регионе увеличилось примерно с 230 объектов в 2024 г. до более чем 340 в 2026 г., а объем рынка почти удвоился в 2020–2026 гг. [17].

Таким образом, энергетическая эффективность цифровой инфраструктуры становится значимой не только для зрелых экономик, но и для развивающихся рынков. Однако характер регуляторных задач различается. В ЕС основной акцент делается на энергоэффективности и декарбонизации; Китай стремится оптимизировать пространственное размещение вычислительных мощностей и сократить зависимость от угольной генерации; Сингапур сочетает цифровое развитие с жесткими ограничениями по территории и ресурсам; страны Латинской Америки уделяют особое внимание надежности электроснабжения, водным ресурсам и предотвращению инфраструктурных ограничений.

Сравнительный анализ регуляторных инструментов. Сравнение выявило существенные различия в используемых инструментах повышения энергоэффективности. Хотя все рассматриваемые юрисдикции стремятся сократить потребление электроэнергии и обеспечить устойчивость цифровой инфраструктуры, набор инструментов определяется особенностями энергетических систем, климата, инфраструктуры и промышленной политики.

В итоге были выделены шесть основных категорий: обязательный мониторинг и отчетность, стандарты энергоэффективности, интеграция возобновляемой энергетики, управление водными ресурсами, регулирование инфраструктуры и электросетей, а также стимулирование технологических инноваций (табл. 1).

Как показывает анализ, к настоящему времени Европейский союз сформировал одну из наиболее комплексных систем мониторинга устойчивости дата-центров. В соответствии с пересмотренной Директивой по энергоэффективности (EED 2023/1791) и Регламентом Комиссии (EU) 2024/1364 дата-центры с установленной ИТ-мощностью не менее 500 кВт должны ежегодно предоставлять стандартизированную информацию. Она включает характеристики объекта, показатели энергопотребления, использование воды и возобновляемой электроэнергии, ИТ-мощность и объем передаваемых данных. Эти сведения формируют основу общеевропейской системы оценки устойчивости [4, 8].

Таблица 1. Сравнительный анализ регуляторных инструментов. *Источник: составлено авторами*

Инструмент	ЕС	Китай	Сингапур	Латинская Америка
Обязательная отчетность	Ежегодная для ЦОД >500 кВт	Обязательная в рамках национальных программ	Для новых проектов	Постепенно вводится в Бразилии и Чили
Показатели энергоэффективности	PUE, WUE, REF, ERF	Регионально дифференцированные требования PUE	Чрезвычайно низкие значения PUE	Формирующиеся национальные стандарты
Возобновляемая энергетика	Постепенное достижение 100% ВИЭ	Не менее 80% в национальных центрах	Не менее 50% низкоуглеродной электроэнергии	Стимулирование PPA и собственной генерации
Управление водой	Мониторинг WUE	Ограниченные требования	Ресурсосберегающие системы охлаждения	Жесткое регулирование, особенно в Чили
Регулирование сетей	Ограниченное	Пространственное перераспределение нагрузки	Квотирование мощностей	Ограничения подключения и софинансирование инфраструктуры
Инновации	Утилизация тепла, ISO 50001	Green computing	Передовые технологии охлаждения	Накопители и распределенная генерация

Особенность европейской модели состоит в использовании нескольких показателей. Помимо Power Usage Effectiveness (PUE), учитываются Water Usage Effectiveness (WUE), Renewable Energy Factor (REF) и Energy Reuse Factor (ERF). Требования постепенно ужесточаются: допустимые значения PUE должны снижаться примерно с 1,5 для существующих объектов до 1,3 для новых ЦОД к 2030 г., а доля возобновляемой электроэнергии должна достигнуть 100% для охватываемых объектов к 2027 г. Дополнительно предусматривается применение интеллектуальных систем учета и сертифицированных систем энергетического менеджмента, включая ISO 50001 и EMAS.

Китай также применяет обязательные стандарты энергоэффективности, однако его модель основана преимущественно на административном контроле. Для крупных действующих ЦОД устанавливается PUE ниже 1,5, а для новых объектов в специализированных вычислительных центрах — не более 1,25. Для государственных дата-центров предусмотрены еще более жесткие ограничения ($PUE \leq 1,3$).

Несоблюдение требований может повлечь отказ в выдаче разрешения на эксплуатацию или ограничение доступа к электросетям.

Сингапур предъявляет особенно высокие требования к эффективности. После трехлетнего моратория на строительство новых ЦОД расширение мощностей допускается для проектов, способных обеспечить исключительно высокую энергоэффективность. Для новых объектов обычно ожидается PUE на уровне 1,3 или ниже, а в рамках конкурсного распределения мощностей — значения, приближающиеся к 1,25. В условиях тропического климата достижение таких показателей стимулирует переход от традиционного воздушного охлаждения к жидкостному охлаждению и эксплуатации серверов при более высоких температурах.

Требования к использованию возобновляемой энергии являются общим элементом регулирования, однако механизмы их реализации различаются. ЕС устанавливает обязательные цели постепенного увеличения доли возобновляемой электроэнергии с достижением полного обеспечения охватываемых объектов возобновляемой энергией к 2027 г. Китай сочетает обязательные целевые показатели с рыночным механизмом Green Electricity Certificates (GEC). Операторы могут приобретать сертифицированную зеленую электроэнергию либо устанавливать прямые связи с крупными ветровыми и солнечными электростанциями в западных провинциях. Эти меры связаны с инициативой «Eastern Data, Western Computing», предусматривающей перенос энергоемких вычислений в регионы с более значительными ресурсами возобновляемой энергетики [9, 10].

В Сингапуре ограниченный потенциал внутренней генерации ВИЭ приводит к иному подходу: акцент делается на трансграничном импорте низкоуглеродной электроэнергии, импортируемом биометане и водородных технологиях [6]. Страны Латинской Америки стимулируют долгосрочные соглашения о покупке электроэнергии (PPA), распределенную генерацию и аккумуляторные системы хранения энергии. Бразилия также планирует масштабные аукционы BESS, а Мексика все чаще требует от крупных операторов участвовать в финансировании сетевой инфраструктуры и локальной генерации.

Управление водными ресурсами становится одним из ключевых факторов различий между национальными системами регулирования. В ЕС водная эффективность в основном учитывается через обязательную отчетность по WUE, тогда как страны Латинской Америки все чаще рассматривают доступность воды как стратегическое ограничение.

Наиболее показателен пример Чили. Экологические органы ввели строгие процедуры разрешения, которые фактически ограничивают применение традиционных водоемких систем охлаждения для новых ЦОД в регионах с дефицитом воды, стимулируя сухое и прямое жидкостное охлаждение. Кроме того, операторы должны раскрывать информацию о потреблении дизельного топлива и энергии в рамках национальной системы энергетической отчетности [13, 14].

Инфраструктурное регулирование также существенно различается. Китай решает проблемы энергоснабжения посредством пространственного планирования, перемещая вычислительные нагрузки из густонаселенных восточных провинций в западные регионы с более высоким потенциалом возобновляемой энергетики. Мексика, напротив, делает акцент на устойчивости локальных сетей: крупные

операторы должны участвовать в финансировании подстанций, линий передачи и систем хранения энергии до получения разрешения на подключение к национальной сети. Таким образом, часть инфраструктурных расходов переносится с государства на частных операторов цифровой инфраструктуры. Бразилия также стимулирует участие операторов в развитии энергосистемы посредством собственной генерации и долгосрочных контрактов на возобновляемую электроэнергию (Табл. 2).

Таблица 2. Примеры регуляторных инноваций. *Источник: составлено авторами*

Страна/регион	Регуляторная инновация	Практическое значение
ЕС	Обязательная отчетность по PUE, WUE, REF и ERF	Унифицированная оценка устойчивости в странах ЕС
Германия	Обязательные цели по утилизации избыточного тепла	Интеграция ЦОД в системы централизованного теплоснабжения
Китай	«Eastern Data, Western Computing»	Перенос ИИ- и облачных нагрузок в регионы с ВИЭ
Китай	Green Electricity Certificate	Масштабное приобретение возобновляемой электроэнергии
Сингапур	Трехлетний мораторий и последующее конкурсное распределение мощностей	Получение новых мощностей только высокоэффективными объектами
Чили	Ограничение водоемкого охлаждения	Распространение сухого и жидкостного охлаждения
Мексика	Обязательное софинансирование сетевой инфраструктуры	Рост частных инвестиций в электросети
Бразилия	Аукционы BESS и обязательные энергоаудиты	Повышение гибкости и устойчивости энергосистемы

Обсуждение. Сравнительный анализ показывает, что глобальный переход к более устойчивой цифровой инфраструктуре не сопровождается унификацией регуляторных подходов. Правительства используют различные комбинации инструментов, отражающие ресурсные ограничения, институциональные особенности и стратегические приоритеты. При этом общая цель — снижение экологического воздействия быстро растущих дата-центров — достигается посредством существенно различающихся механизмов.

С точки зрения концепции управления экоинновациями полученные результаты подтверждают, что экологическое регулирование выступает не только механизмом обеспечения соответствия требованиям, но и фактором технологических инноваций. Вместо единообразного ограничения энергопотребления государства

стимулируют развитие энергоэффективных технологий, интеграцию ВИЭ, современные системы охлаждения, интеллектуальный мониторинг и новые организационные решения. Это соответствует теоретическому положению о том, что грамотно сформированное экологическое регулирование может одновременно ускорять технологическую модернизацию и повышать экологическую результативность [16].

Приоритеты регулирования определяются прежде всего специфическими ресурсными ограничениями, а не уровнем цифровизации как таковым. В ЕС, где энергетические рынки относительно стабильны, а климатическая политика занимает центральное место, основное внимание уделяется прозрачности, стандартизированной отчетности и последовательному повышению показателей эффективности. Обязательная отчетность по PUE, WUE, REF и ERF создает информационную основу для сопоставления объектов и постепенного ужесточения стандартов.

Китай представляет иной тип регулирования, интегрируя политику в отношении ЦОД в более широкую систему промышленного и регионального развития. Инициатива «Eastern Data, Western Computing» демонстрирует возможность одновременного решения экологических и промышленных задач посредством перераспределения вычислительных нагрузок в регионы с высоким потенциалом возобновляемой энергетики. В результате стимулируются не только повышение энергоэффективности, но и развитие green computing, жидкостного охлаждения и энергоэффективного оборудования для ИИ.

Сингапур демонстрирует модель, в которой дефицит территории и ресурсов превращает регулирование в механизм технологического отбора. Высокие требования к PUE после моратория фактически ограничивают использование традиционных технологических решений и стимулируют внедрение современных систем охлаждения, оптимизацию архитектуры серверов и использование низкоуглеродной энергии. В отличие от европейского подхода, основанного на раскрытии информации и постепенном повышении эффективности, Сингапур использует ограничение доступа к новым мощностям.

Опыт Латинской Америки показывает расширение экологического регулирования за пределы климатической политики в сторону более широкого управления ресурсами. Бразилия, Чили и Мексика уделяют больше внимания устойчивости энергосистем, водной безопасности и инфраструктурным ограничениям. Ограничения Чили на водоемкие технологии охлаждения отражают значение дефицита воды, тогда как требования Мексики к софинансированию расширения электросетей свидетельствуют о переходе к распределению ответственности за развитие критической инфраструктуры между государством и операторами ЦОД.

Практический вывод состоит в том, что успешное регулирование не должно основываться на прямом копировании зарубежных инструментов. Механизмы, разработанные для регионов с большим потенциалом возобновляемой энергетики, могут быть малоэффективны в странах с дефицитом воды, тогда как европейские системы отчетности могут давать ограниченный эффект там, где главным ограничением является сама энергетическая инфраструктура. Поэтому перспективные регуляторные системы должны сочетать международно признанные показатели

устойчивости с инструментами, адаптированными к национальным энергетическим системам, климатическим условиям и инфраструктурным возможностям.

Заключение. Проведенный сравнительный анализ показывает, что государства используют широкий спектр инструментов, включая обязательную отчетность, стандарты энергоэффективности, требования к возобновляемой энергетике, управление водными ресурсами и инфраструктурное планирование.

При этом регуляторные приоритеты и механизмы реализации существенно различаются. Эти различия во многом объясняются структурой энергетических систем, климатическими условиями, доступностью ресурсов, инфраструктурными возможностями и промышленной политикой.

Перспективные направления дальнейших исследований включают количественную оценку эффективности различных моделей регулирования с использованием показателей энергоэффективности, интеграции возобновляемой энергетики и выбросов углерода, а также анализ того, как дальнейшее развитие технологий искусственного интеллекта будет влиять на будущие требования к цифровой инфраструктуре.

Литература/References

1. IEA, 2025. World Energy Outlook Special Report. Energy and AI.
2. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/de9dea13-b07d-42c5-a398-d1b3ae17d866/EnergyandAI.pdf>
3. Wang, Q., Li, Y., & Li, R. (2024). Ecological footprints, carbon emissions, and energy transitions: the impact of artificial intelligence (AI). *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1–18.
4. Wang Y, Lei H, Zhang W, Jia E and Guo F (2026) Analysis of China's power development and the impact of data center energy consumption. *Front. Energy Res.* 14:1774740. doi: 10.3389/fenrg.2026.1774740
5. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast).
6. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>
7. Zhang, Y., Li, H., and Wang, S. (2025). Decarbonizing data centers through regional bitsmigration: A comprehensive assessment of China's 'eastern data, Western computing' initiative and its global implications. *Applied Energy*, 392, 126020.
8. Singapore Green Data Centre Roadmap.
9. <https://www.imda.gov.sg/how-we-can-help/green-dc-roadmap>
10. JLL. Latin America Data Center Report, Year-End 2025.
11. <https://www.jll.com/en-us/insights/latin-america-data-center-report-year-end-2025>
12. Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1364.
13. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2024/1364/oj
14. Tsinghua University. Eastern Data, Western Computing.
15. <https://www.iii.tsinghua.edu.cn/info/1121/2978.htm>
16. Green Electricity Certificates.
17. <https://redex.eco/about-green-electricity-certificates/>
18. Singapore Standard SS 715:2025.
19. <https://www.imda.gov.sg/assets/91d339bc-d189-403a-80cf-f0557bbc00cd.pdf>
20. DNV. Energy Transition Outlook 2025: Latin America.

21. <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/2025/latin-america/>
22. Energy Partnership Chile. Data Centres in Chile.
23. <https://energypartnership.cl/news/data-centres-in-chile/>
24. Ministerio de Energía de Chile. Ruta Energética 2026–2030.
25. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/ruta_2026-2030.pdf
26. Mexico Business. Energy constraints slow Mexico's data center expansion.
27. <https://mexicobusiness.news/cloudanddata/news/energy-constraints-slow-mexicos-data-center-expansion>
28. Xavier, A., Reyes, T., Aoussat, A., Luiz, L., & Souza, L. (2020). Eco-innovation maturity model: A framework to support the evolution of eco-innovation integration in companies. *Sustainability*, 12(9), 3773.
29. Baxtel. Data Centers in Latin America (LATAM).
30. <https://baxtel.com/data-center/latin-america-latam>

Поступила в редакцию 1 сентября 2026 г.

Принята к публикации 23 сентября 2026 г.