

УДК 621.311.001.57+004.942

URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/tech_org_const/eco_man/1057.html

АНАЛИЗ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Е.И. Шевалдина¹

Shevaldinalena@mail.ru

К.С. Шевалдина²

ks090106@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация

² Институт физики ФГАОУ ВО КФУ,
Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

В условиях растущего потребления электроэнергии, вызванного развитием искусственного интеллекта и увеличением объемов данных, центры обработки данных (ЦОД) сталкиваются с серьезными вызовами в обеспечении стабильного энергоснабжения. Атомная энергетика, особенно маломощные модульные реакторы (ММР), представляет собой перспективное решение, способное обеспечить ЦОД надежной и экологически чистой энергией. В статье рассматриваются необходимость, предпосылки, преимущества и трудности строительства центров обработки данных на атомной энергии (ЦОДАЭ) путем интеграции ММР в инфраструктуру ЦОД, а также потенциальные решения для обеспечения устойчивого энергоснабжения. Были использованы публикации в научных журналах и интернет-изданиях, затрагивающие тему исследования. В расширенном поиске было изучено 126 источников. Дальнейшее ограничение по времени написания с 2024 г. по настоящее время, исключение публикаций с пересказом первоисточников сузило область поиска до 27 источников. В качестве методов исследования были использованы теоретические методы изучения источников и литературы: анализ, синтез, индукция, дедукция, контент-анализ, сопоставительный анализ и моделирование. Предложено решение проблемы энергопотребления ЦОД за счет использования ММР при строительстве ЦОДАЭ, которые имеют ряд преимуществ: низкий уровень выбросов углекислого газа, небольшое физическое присутствие, стабильное и надежное питание, высокую экономическую эффективность. Существуют трудности, связанные со строительством ЦОДАЭ, такие как нормативные барьеры, общественное мнение, ограниченное количество доступных ММР и проблема утилизации отходов. В мире уже есть примеры мини-АЭС, которые могут рассматриваться как платформа для создания ММР в составе ЦОДАЭ, такие как плавучая АЭС «Академик Ломоносов» в России и модульный реактор HTR-PM в Китае. Сделан вывод, что использование малых модульных реакторов в ЦОДАЭ является перспективным решением для обеспечения надежного и экологически чистого энергоснабжения.

Ключевые слова: центр обработки данных, дата-центр, искусственный интеллект, маломощный модульный реактор, энергоснабжение, энергодефицит, строительство, атомная энергия

Введение. Стремительное развитие искусственного интеллекта (ИИ) и больших языковых моделей (Large Language Model — LLM) провоцирует беспрецедентный рост энергопотребления, связанный с масштабированием вычислительных мощностей и расширением инфраструктуры центров обработки данных (ЦОД). По оценкам Международного энергетического агентства, к 2026 г. энергозатраты ЦОД могут удвоиться, достигнув 1000 ТВт · ч — уровня, сопоставимого с потреблением Японии. Традиционные источники энергии, включая возобновляемые, сталкиваются с ограничениями: возобновляемые источники энергии (ВИЭ) зависят от погодных условий, а ископаемое топливо усугубляет углеродный след. В этом контексте применение мало-мощных модульных реакторов (ММР) может быть принято как ключевое решение, сочетающее стабильность атомной генерации с гибкостью модульного дизайна. Проекты вроде российской плавучей АЭС «Академик Ломоносов» и китайского HTR-PM демонстрируют потенциал ММР для интеграции с ЦОД, обеспечивая энергобезопасность и снижение выбросов. Однако массовое внедрение тормозится регуляторными барьерами, общественными предубеждениями и технологическими вызовами, требующими международной кооперации и инновационных подходов к энергетической инфраструктуре будущего.

Современные публикации сходятся во мнении, что рост энергопотребления центров обработки данных, обусловленный развитием ИИ и LLM, требует перехода к устойчивым энергетическим решениям.

В научной литературе до сих пор нет достаточно полных академических исследований на тему зависимости энергопотребления ЦОД от нагрузки, связанной с развитием нейросетей и процессами машинного обучения. Выяснить, сколько энергии «съедают» нейросети в центрах обработки данных, — непростая задача. Данные об энергозатратах скрыты коммерческой тайной, а точные измерения и стандарты отчетности отсутствуют. Кроме того, стремительное развитие технологий и высокая стоимость оборудования не позволяют ученым угнаться за постоянно меняющейся картиной энергопотребления в сфере ИИ. Поэтому основная информация в этом исследовании была получена из разрозненных, но релевантных интернет-сообщений на платформах IT-компаний и других бизнес-источников.

Тема создания и использования ядерной энергии на базе ММР в контексте ее использования в энергосетях достаточно хорошо изучена. В научных публикациях на тему развития энергетики исследователи (Khosravi et al., 2024) из Центра промышленной механики Университета Южной Дании (University of Southern Denmark (SDU), Дания) и ученые (Zong et al., 2024) Китайского национального института стандартизации (China National Institute

of Standardization, Пекин, Китай) единодушно отмечают, что традиционные источники энергии, такие как угольная или дизельная генерация, противостоят целям декарбонизации, гидроэнергетика ограничена в использовании по причинам, связанным с переселением людей и нарушением экосистем в пойме рек, а возобновляемые источники сталкиваются с проблемами прерывистости и ограниченной мощности [1, 2]. Ali Khosravi и соавторы сфокусировались также на интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистемы ЦОД, включая контракты на «зеленую» энергию и инвестиции в локальные проекты [1].

Учеными (Cha, 2024) из группы по анализу и оценке исследований и разработок Корейского института научной и технологической информации (KISTI, Тэджон, Республика Корея) и их коллегами (Lu, 2024) из Базовой Международной школы Ханчжоу (BASIS International School Hangzhou, Чжэцзян, Китай) ММР рассматриваются как ключевая технология, способная обеспечить стабильную базовую нагрузку для энергоемких ЦОД [3, 4]. Кроме того, Seokki Cha провел сценарный анализ, выделив девять траекторий развития ММР. Наиболее перспективным назван сценарий «Эпохи радикальных инноваций», где ММР обеспечивают 70 % энергии ЦОД через распределенные системы.

Исследователи (Wang et al., 2024) кафедры электротехники и вычислительной техники Университета Альберты из Канады (University of Alberta, Эдмонтон, Канада) и ученые из Севастопольского государственного университета (Акимов и др., 2022) отмечают технологические преимущества ММР, например, такие как модульность и масштабируемость (от 10 до 300 МВт), что позволяют адаптировать реакторы под нужды ЦОД [5, 6].

В исследованиях сотрудников (Poudel & Gokaraju, 2023) Университета Саскачевана (University of Saskatchewan, Саскатун, Канада) также отмечена возможность создания гибридных систем, сочетающих ММР с возобновляемыми источниками энергии и накопителями, что повышает их КПД до 92 % за счет рекуперации теплоты [7].

В исследовании, проведенном группой ученых (Khan et al., 2024) из Центра устойчивых энергетических технологий Университета имени короля Сауда (King Saud University, Эр-Рияд, Саудовская Аравия), обращено внимание на экономическую эффективность ММР, при которой стоимость электроэнергии оценивается в 100–150 долл. США / (МВт · ч), что делает ММР конкурентоспособными по сравнению с дизельными генераторами [8].

Вопросам лицензирования, безопасности, упрощения процедур и разработки стандартов для ММР уделено внимание в исследованиях авторов (Sainati et al., 2019) из Школы гражданского строительства Лидского универ-

ситета (School of Civil Engineering, University of Leeds, Великобритания) и из Севастопольского государственного университета России (Акимов и др., 2022) [5, 9].

Изучению общественного принятия программ по развитию технологий ММР посвящено исследование ученых (Cho & Lee, 2025) из Центра институциональных инноваций Национального института зеленых технологий Южной Кореи (National Institute of Green Technology, Сеул, Южная Корея). Ими было установлено, что 78 % респондентов в Южной Корее поддерживают ММР, но лишь 34 % осведомлены об их экопреимуществах [10].

Российские научные публикации ученых (Шульга, 2023; Сухобок и Мысева, 2023) из Российского федерального ядерного центра — Всероссийского НИИ технической физики и Национального исследовательского ядерного университета МИФИ — содержат международный контекст изучения развития технологии ММР. Россия, Китай и США активно развивают ММР (РИТМ-200, НТР-РМ, ARDP), но санкции и геополитика влияют на сотрудничество [11, 12].

Ученые (Giorgio Locatelli и соавт., 2014) из Миланского политехнического института (Politecnico di Milano, Милан, Италия) предоставили стратегический обзор ММР, выделив два барьера, мешающих их активной разработке и внедрению, — это осторожность использования ядерной энергетики и вопросы безопасности после Фукусимы, а также высокие капитальные затраты [13].

В российских исследованиях также содержатся некоторые уникальные выводы. Так, А.М. Акимов с соавторами акцентировали снижение капитальных затрат на 30...40 % благодаря модульности, А.И. Осинцева из Казанского государственного энергетического университета рассмотрела проблему ядерных отходов, объем которых у ММР в 2–30 раз выше, чем у традиционных АЭС [5].

В плане перспектив и рекомендаций по развитию ММР-технологий исследователи предлагают многоуровневый подход. Краткосрочные меры — это регуляторные «песочницы» и метрики энергоэффективности (например, Сухов и др., 2022), среднесрочные меры — это развитие производственных цепочек и гибридных систем (Poudel & Gokaraju, 2023), долгосрочные — это международная стандартизация и решение проблем отходов (Дьяков, 2023; Осинцева, 2023) [7, 14–16].

Таким образом, новизна проведенного нами исследования состоит в глубоком переосмыслении и обобщении имеющихся публикаций по теме ММР и интеграции этих знаний с необходимостью обеспечения бесперебойного и качественного энергоснабжения ЦОД в условиях намечающегося острого дефицита электроэнергии от традиционных источников, вызванного скачкообразным увеличением количества оборудования, поддерживающего ИИ-

технологии. Сам термин «ЦОДАЭ» (центр обработки данных на атомной энергии) предложен нами впервые как синтез двух современных направлений развития технологий.

Материалы и методы. Материалом для настоящего исследования послужили публикации в научных журналах, интернет-изданиях и аналитических отчетах, посвященные изучаемой теме. Первоначально в ходе расширенного поиска было проанализировано 147 источников. Дальнейшее ограничение по временным рамкам — публикация материалов с 2022 г. по настоящее время — и исключение материалов, содержащих пересказ первоисточников, позволило сузить область исследования до 21 научного источника, индексируемого в международных и российских цитатно-аналитических базах данных и 26 интернет-источников, отражающих самую актуальную информацию по выбранной теме.

Для всестороннего изучения темы помимо текстовых научных материалов были проанализированы статистические данные и отчеты энергетических компаний, что позволило получить более полное представление о практических аспектах энергопотребления LLM в ЦОД. Также были учтены выступления экспертов на конференциях и онлайн-семинарах, посвященных вопросам энергоэффективности и устойчивого развития в сфере информационных технологий. Особое внимание уделялось технологической документации и спецификациям оборудования, используемого в ЦОД, для оценки его энергопотребления.

В качестве основных методов исследования использовались теоретические методы изучения источников и литературы, включающие анализ, синтез, индукцию, дедукцию, контент-анализ, сопоставительный анализ и моделирование. Применение сопоставительного анализа позволило выявить ключевые тенденции и различия в подходах к оценке энергоэффективности LLM в разных регионах мира. Методы моделирования использовались для прогнозирования будущих тенденций в энергопотреблении ЦОД с учетом развития технологий и изменений в политике регулирования.

Название статьи «Анализ малых модульных реакторов в энергосистемах центров обработки данных» обосновано тем, что оно отражает суть предлагаемой концепции: рассмотрение малых модульных реакторов и их размещение непосредственно на территории ЦОД как инновационного решения для создания энергоэффективной и устойчивой инфраструктуры центров обработки данных, что соответствует концепции создания инфраструктуры будущего.

Результаты исследования. Развитие ИИ существенно влияет на увеличение потребления электроэнергии, что обусловлено несколькими важными факторами. К ним относятся рост вычислительных мощностей, необходи-

мость обучения и внедрения ИИ-моделей и увеличение числа дата-центров, специально оптимизированных для работы с ИИ.

Рост вычислительных мощностей объясняется тем, что современные технологии ИИ, особенно генеративные модели, требуют значительных ресурсов для обработки данных [17]. При обучении крупных языковых моделей (LLM) и других сложных систем ИИ необходим огромный объем вычислений и, соответственно, значительное количество энергии. На обучение одной такой модели может потребоваться от 85,4 до 134,0 ТВт · ч электроэнергии¹.

Для обработки больших объемов данных и реализации сложных алгоритмов требуется мощное оборудование, такое как графические процессоры (GPU). Например, новые графические процессоры от NVIDIA могут потреблять до 1200 Вт энергии каждый. При этом в оценках учитывается только мощность, потребляемая чипами, и не учитывается потребление энергии системами хранения, памятью, сетями и другими компонентами, используемыми для генеративного ИИ².

Средняя нагрузка на серверную стойку обычного ЦОД составляет от 7 до 12 кВт в зависимости от сферы деятельности и бизнеса, тогда как стойки, использующиеся для работы ИИ, потребляют от 30 до 100 кВт³.

Однако электроэнергия требуется не только для вычислительных процессов, необходимо учитывать расходы на охлаждение серверов и инфраструктуры дата-центров. Компании расходуют миллиарды литров воды и значительное количество электроэнергии для поддержания оптимальной температуры в своих дата-центрах. Энергозатраты на системы охлаждения обычно составляют 30...50 % от общего потребления энергии.

Жидкостное охлаждение стало общепринятой практикой, и новые методы включают полное погружение и охлаждение непосредственно на уровне кристаллов. Например, в 2018 г. компания Microsoft затопила свой центр обработки данных на дне Шотландского моря, погрузив 864 сервера и 27,6 петабайта хранилища на глубину 35,7 м. Охлаждающий эффект морской воды значительно повысил энергоэффективность этого решения⁴.

¹ Joule: Article on energy consumption // Cell. URL: [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(23\)00365-3?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435123003653%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(23)00365-3?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435123003653%3Fshowall%3Dtrue) (accessed January 27, 2025).

² Generative AI to account for 1.5% of world's power consumption by 2029 // AI Wire. URL: <https://www.aiwire.net/2024/07/08/generative-ai-to-account-for-1-5-of-worlds-power-consumption-by-2029/> (accessed January 27, 2025).

³ Повышенные нагрузки: как развитие ЦОД влияет на энергопотребление в России // Sber. URL: <https://sber.pro/publication/povishennye-nagruzki-kak-razvitie-tsod-vliyaet-na-enerGOPotreblenie-v-rossii/> (дата обращения 27.01.2025).

⁴ Microsoft's underwater data center project Natick // The Verge. URL: <https://www.theverge.com/2018/6/6/17433206/microsoft-underwater-data-center-project-natick> (accessed January 27, 2025).

По прогнозам аналитической корпорации Gartner, Inc., в течение следующих двух лет потребление электроэнергии в центрах обработки данных вырастет на 160 %. В результате к 2027 г. 40 % существующих ЦОД с ИИ будут ограничены в работе из-за нехватки электроэнергии. По словам Боба Джонсона, вице-президента-аналитика корпорации Gartner, «взрывной рост новых гипермасштабируемых центров обработки данных для внедрения GenAI создает ненасытный спрос на электроэнергию, который превысит возможности поставщиков услуг по достаточно быстрому расширению своих мощностей, это угрожает перебоями в подаче электроэнергии и приведет к ее дефициту, что ограничит рост новых центров обработки данных для GenAI и других целей с 2026 года»⁵.

По прогнозам Международного энергетического агентства (IEA), к 2026 г. потребление энергии дата-центрами может удвоиться и составить 1000 ТВт · ч. Это эквивалентно годовому потреблению электроэнергии в таких странах, как Япония⁶.

Оценки компании Gartner несколько скромнее, ее аналитики предполагают, что в 2027 г. мощность, необходимая центрам обработки данных для работы дополнительных серверов, оптимизированных для ИИ, достигнет 500 ТВт · ч в год, что в 2,6 раза больше, чем в 2023 г.

В разных уголках мира планируется строительство новых, более крупных ЦОД, а значит, дефицит электроэнергии сохранится на длительный срок. Ввод в эксплуатацию новых мощностей для передачи, распределения и производства электроэнергии может занять несколько лет. Неизбежным следствием этого дефицита станет рост цен на электроэнергию. Дополнительные расходы лягут на плечи поставщиков продуктов и услуг в области ИИ, что, в свою очередь, отразится на всех конечных потребителях ИИ-технологий.

«Центры обработки данных являются основой цифровых инноваций, но их огромные потребности в энергии стали критическим узким местом, препятствующим росту», — сказал Уильям Терон, основатель и генеральный директор компании Deep Atomic⁷.

Россия не стоит в стороне от общемировых процессов. В последние годы вслед за ростом объема больших данных стремительно увеличивается и ко-

⁵ Gartner predicts power shortages will restrict 40 percent of AI data centers by 2027 // Gartner. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-11-12-gartner-predicts-power-shortages-will-restrict-40-percent-of-ai-data-centers-by-20270> (accessed January 27, 2025)

⁶ Electricity 2024 // IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary> (accessed January 27, 2025).

⁷ Deep Atomic launches data center-specific SMR // Data Center Dynamics. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/deep-atomic-launches-data-center-specific-smr/> (accessed January 27, 2025).

личество ЦОД. Согласно оценке аналитической компании BusinesStat, за 2018–2022 гг. рынок ЦОД в России вырос более чем в 2,5 раза. По расчетам компании, в России работает более 80 коммерческих дата-центров. Среди крупнейших — центр «Ростелекома», IXcellerate, DataPro, Selectel⁸.

По данным компании iKS-Consulting, по итогам 2023 г. в России в коммерческих ЦОД введено 70 100 стойко-мест, что на 20,9 % больше, чем годом ранее. Количество стоек в корпоративных ЦОД, по оценкам iKS-Consulting, на конец 2023 г. составило около 310 000⁹.

Электроснабжение центров обработки данных в России в основном осуществляется через подключение к Единой энергосистеме страны. Для обеспечения стабильного энергоснабжения дата-центра необходимо учитывать не только потребляемую мощность, организовывать резервирование и автоматизацию систем электроснабжения, но и соблюдать требования по энергоэффективности и безопасности. По данным АО «Системный оператор ЕЭС», в апреле 2024 г. объем фактически присоединенной мощности ЦОД, исключая «серый» майнинг, оценивался в 2576 МВт, при этом почти столько же было утвержденных технических условий на подключение. В целом мощность центров обработки данных, включая весь майнинг, может вырасти до 9630 МВт в обозримом будущем¹⁰.

Увеличение энергопотребления связано с новыми цифровыми реалиями, такими как запуск цифровых проектов, рост популярности ИИ и увеличение объема хранимых и обрабатываемых данных. Центры обработки данных развиваются кластерами в местах потребления, причем в Москве сосредоточено более 70 % ЦОД, в Санкт-Петербурге — свыше 10 %, а остальные расположены по всей территории России. Это распределение, за исключением Москвы, благоприятно сказывается на развитии ИИ и не является критичным для ситуации с энергопотреблением в стране. Тем не менее необходимо учитывать стремительное развитие ЦОД в России, что требует обеспечения их современными энергетическими инфраструктурами и надежными источниками энергии.

Поскольку ЦОД нуждаются в бесперебойном электроснабжении круглосуточно, единственными подходящими источниками энергии могут стать гидроэлектростанции, электростанции на ископаемом топливе или атомные

⁸ Данные о центрах обработки данных в России // BusinesStat. URL: https://businesstat.ru/images/demo/data_centers_russia_demo_businesstat.pdf (дата обращения 27.01.2025).

⁹ Опрос по центрам обработки данных // IKS Consulting. URL: <https://survey.iksconsulting.ru/page30265406.html> (дата обращения 27.01.2025).

¹⁰ Пресс-релиз о новых решениях для центров обработки данных // SO-UPS. URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/24642/> (дата обращения 27.01.2025).

электростанции. Таким образом, помимо решения вопросов энергоэффективности работы ЦОД становится актуальной проблема обеспечения их гарантированным и достаточным энергоснабжением с учетом возможного роста числа и мощности этих центров.

Для удовлетворения такого уровня потребления требуется возобновляемый источник энергии. Атомная энергетика представляет собой уникальный вариант экологически чистой энергии для центров обработки данных. Ядерное деление и синтез способны генерировать огромное количество энергии с низким углеродным следом. В отличие от источников энергии, зависящих от погодных условий, таких как ветер и солнце, ядерные реакторы работают круглосуточно. Другие чистые источники энергии, такие как водород, солнечная и ветровая энергия, могут служить дополнительными источниками, но ядерная энергетика остается наиболее мощным и практически неисчерпаемым вариантом для обеспечения ЦОД [18], причем не просто ядерная энергетика, а энергетика, основанная на энергии, вырабатываемой ММР. Эти реакторы представляют собой меньшие по размеру и более компактные версии обычных ядерных реакторов. При этом ММР на наш взгляд должен быть физически совмещен с ЦОД, что по сути будет представлять собой центр обработки данных на атомной энергии (ЦОДАЭ). Такие ядерные реакторы на быстрых нейтронах обычно используются для питания подводных лодок и авианосцев, обеспечивая их энергией на срок до 20 лет без перебоев. Если ядерные реакторы на быстрых нейтронах можно будет безопасно производить в составе ЦОДАЭ в больших масштабах, они смогут стать реальным выходом из ситуации дефицита энергии в сфере информационных технологий. Причем это будут инфраструктурные проекты с минимальными требованиями к обслуживанию.

Например, американский инвестиционный фонд Digital Realty, являющийся провайдером дата-центров, который строит, владеет, управляет и инвестирует в независимые от оператора ЦОД по всему миру, считает атомную энергетiku оптимальным источником энергии для питания ЦОД ИИ. Директор Digital Realty Крис Шарп предсказывает, что в не столь отдаленном будущем ЦОД будут иметь встроенные ММР¹¹.

Маломощные модульные ядерные реакторы – это новые разработки, которые обещают ускорить внедрение надежной безуглеродной энергетики по мере роста спроса на электроэнергию в ЦОД. Как правило, мощность таких реакторов составляет 300 МВт или меньше. Их можно собирать из несколь-

¹¹ How to implement nuclear energy for data centers // TechTarget. URL: <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-to-implement-nuclear-energy-for-data-centers> (accessed January 27, 2025).

ких модулей на месте, что снизит капитальные затраты, которые препятствуют строительству более крупных установок.

Центры обработки данных на основе усовершенствованных ММР, мощность которых колеблется от десятков до сотен мегаватт, обладают множеством преимуществ.

Одним из ключевых достоинств ЦОДАЭ может стать низкий уровень выбросов углекислого газа. Производство и потребление энергии являются основными антропогенными источниками загрязнения атмосферы. К таким загрязнителям относятся твердые частицы, оксиды серы и оксиды азота, которые ухудшают качество воздуха. Ядерная энергетика практически не производит загрязняющих веществ, что позволяет ЦОДАЭ способствовать поддержанию чистоты воздуха и снижению уровня вредных выбросов.

Согласно данным некоммерческой исследовательской организации Our World in Data, сжигание угля приводит к выбросам парниковых газов в объеме 970 т/(ГВт · ч), что в 160 раз превышает уровень выбросов при использовании ядерной энергии. Сжигание нефти вызывает на 714 т больше выбросов, чем ядерная энергия, а сжигание природного газа — на 434 т больше [19]. В среднем солнечная и ветровая энергия тоже приводят к большему количеству выбросов: на 47 и 5 т соответственно по сравнению с ядерной энергией. Таким образом, использование ядерной энергии может значительно ускорить процесс декарбонизации ЦОД по всему миру¹².

Центры обработки данных на ядерной энергетике имеют относительно небольшое физическое присутствие. Дата-центры, в которые модульно смонтированы ММР, суммарно занимают значительно меньше места, чем дата-центры, запитанные от других источников энергии. Для работы ММР мощностью 1000 МВт требуется площадь в 5 км², для производства такого же количества энергии ветряным электростанциям и солнечным электростанциям требуется в 360 и в 75 раз больше места соответственно.

Маломощные модульные реакторы обычно имеют мощность до 300 МВт и могут быть расположены в компактных модулях [20]. Это и позволяет нам говорить о возможности создания ЦОДАЭ, т. е. об установке ММР непосредственно на территории дата-центров, что снижает затраты на транспортировку электроэнергии и минимизирует потери при передаче.

Маломощные модульные реакторы в составе ЦОДАЭ обеспечивают стабильное и надежное питание. Поскольку ядерная энергия обладает высокой энергоемкостью, то есть количеством электроэнергии, которое вырабатывает

¹² Nuclear energy // Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy> (accessed January 27, 2025).

генератор при максимальной мощности, ММР имеют наивысшую плотность энергии, т. е. вырабатывают большее количество энергии при малом расходе топлива. Маломощные модульные реакторы могут работать круглосуточно, не зависят от погодных условий, как это происходит с солнечными и ветряными электростанциями, и обеспечивают стабильную и надежную подачу электроэнергии, которая необходима ЦОД для обеспечения максимальной бесперебойной работы.

Центры обработки данных на ядерной энергетике обладают более высокой экономической эффективностью. Хотя первоначальные инвестиции в строительство ЦОДАЭ могут быть значительными, их эксплуатационные расходы обычно ниже благодаря высокой эффективности и низким затратам на топливо. ЦОДАЭ также требуют меньше времени на строительство по сравнению с традиционными атомными электростанциями и отдельно строящимися ЦОД.

Реакторы на быстрых нейтронах в составе ЦОДАЭ требуют минимального вмешательства со стороны операторов центров обработки данных, хотя это не отменяет того факта, что техническое обслуживание оборудования и утилизация ядерных отходов должны выполняться высококвалифицированными специалистами.

Создание ЦОДАЭ сопряжено с рядом трудностей, несмотря на очевидные преимущества. Одной из главных проблем являются нормативные барьеры. Строгие правила и высокие требования к безопасности могут замедлить процесс проектирования и строительства таких объектов. Безопасность занимает центральное место, поэтому использование ядерной энергии требует соблюдения четких стандартов, которым должны соответствовать ЦОДАЭ.

Еще один важный фактор — общественное мнение. Ядерная энергия нередко вызывает у людей опасения из-за потенциальных рисков, связанных с безопасностью и утилизацией отходов. Прошлые аварии на ядерных реакторах, такие как катастрофа на Чернобыльской АЭС, в Фукусиме и Три-Майл-Айленд, оставили в сознании общества негативные ассоциации с использованием ядерной энергии.

В настоящее время количество доступных ММР ограничено. Это связано с необходимостью значительных капиталовложений и длительными сроками разработки. Финансирование строительства ядерных объектов представляет собой сложную задачу, поэтому только крупнейшие ЦОД могут рассматривать возможность использования ядерной энергии. Помимо этого эксплуатация таких объектов требует значительных расходов из-за строгих протоколов безопасности и необходимости привлечения высококвалифицированного персонала для управления реакторами [21].

Еще одной важной проблемой станет утилизация отходов. Хотя ММР производят относительно небольшое количество отходов, отработанное топливо остается опасным материалом, который сложно утилизировать. Соблюдение строгих стандартов безопасности — сложная, но необходимая задача для обеспечения защиты. В то же время технологии переработки и повторного использования ядерной энергии все еще находятся на стадии разработки и тестирования.

Наконец, необходимо подтвердить перспективность совмещения ЦОД с ММР для создания устойчивого энергоснабжения. Это направление требует дополнительных исследований и доказательств своей эффективности.

На данный момент в мире существует всего две мини-АЭС, которые уже введены в эксплуатацию и могут рассматриваться как платформа для создания ММР в составе ЦОДАЭ.

1. Плавучая АЭС «Академик Ломоносов» (Россия). Эта станция была впервые подключена к электросети в декабре 2019 г. и введена в промышленную эксплуатацию в мае 2020 г. Она имеет мощность около 70 МВт и предназначена для обеспечения электроэнергией удаленных районов, таких как Чукотка¹³.

2. Модульный реактор HTR-PM (Китай). В 2021 г. в Китае был запущен первый модульный высокотемпературный газоохлаждаемый реактор HTR-PM, который имеет мощность 210 МВт. Этот проект стал значительным шагом в развитии маломощных атомных реакторов¹⁴.

Во всех странах с развитой ядерной энергетикой активно ведутся работы по созданию усовершенствованных МММ¹⁵. Так, специалисты российской атомной отрасли рассчитывают с 2032 г. начать серийный выпуск мини-АЭС мощностью 10 МВт на базе реакторных установок «Шельф-М». Об этом сообщил главный конструктор реакторных установок атомных станций малой мощности (АСММ) «Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники имени Доллежала (НИКИЭТ) Денис Куликов¹⁶.

В Якутии запланировано строительство головного атомного энергоблока с реактором «Шельф-М» в районе золоторудного месторождения Совиное.

¹³ Пока США только создают ММР, Росатом меняет топливо на первой в мире мини-АЭС // EADaily. URL: <https://eadaily.com/ru/news/2023/11/24/poka-ssha-tolko-sozdayut-mmr-rosatom-menyaet-toplivo-na-pervoy-v-mire-mini-aes> (дата обращения 27.01.2025).

¹⁴ Первый в мире высокотемпературный ГА // Страна Росатом. URL: <https://strana-rosatom.ru/2021/09/17/pervyyj-v-mire-vysokotemperaturnyj-ga/> (дата обращения 27.01.2025).

¹⁵ Новые технологии для центров обработки данных // Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/timeweb/articles/674834/> (дата обращения 27.01.2025).

¹⁶ Серийное производство российских мини-АЭС мощностью 10 МВт начнется в 2032 году // HighTech. URL: <https://hightech.plus/2023/06/07/seriinoe-proizvodstvo-rossiiskih-mini-aes-moshnostyu-10-mvt-nachnetsya-v-2032-godu> (дата обращения 27.01.2025).

Ожидается, что энергоблок будет введен в эксплуатацию в 2030 г., а серийное производство модулей начнется в 2032 г. Главная цель этой маломощной атомной станции — обеспечить автономное теплоснабжение и электроэнергию для потребителей. Тепловая мощность установки составит 35 МВт, а электрическая — 10 МВт. Станция будет масштабируемой благодаря возможности добавления дополнительных энергокапсул с реакторами.

Проект предусматривает срок службы модуля в 60 лет, а одно из главных его преимуществ — легкость транспортировки, например, с помощью баржи. Этот проект является одним из самых маломощных среди будущих малых российских атомных электростанций. Следующим по мощности станет АЭС на базе реактора РИТМ-200Н с мощностью 55 МВт, которая будет построена в поселке Усть-Куйга для обеспечения Кючусского золоторудного месторождения. Начало строительства намечено на 2024 г., а ввод в эксплуатацию — до 2030 г. Для небольших потребностей планируется строительство реактора «Елена АМ» мощностью до 400 кВт¹⁷.

В России активно продолжают работы по созданию высокотехнологичных ЦОД, которые будут получать энергию от ММП и станут частью атомной энергетики.

Центр обработки данных «Калининский», расположенный рядом с Калининской атомной электростанцией, стал первым в сети защищенных дата-центров «Росатома». Он способен обеспечивать мощность до 48 МВт и предлагает такие услуги, как резервное копирование и облачные вычисления. Близость к АЭС позволяет обеспечить привлекательные тарифы на электроэнергию и высокий уровень безопасности.

В Иннополисе (Татарстан) запланировано строительство нового дата-центра мощностью 16 МВт, который будет включать 1000 стоек с возможностью расширения до 2000. Проект предполагает использование энергии от ближайших АЭС для обеспечения бесперебойного энергоснабжения.

На Кольской АЭС разрабатывается модульный ЦОД «Арктика» с мощностью 1 МВт и возможностью удвоения. Этот центр будет обслуживать организации, работающие в Арктической зоне, и станет базовой инфраструктурой для новых цифровых платформ и сервисов.

Концерн «Росэнергоатом» совместно с компанией «ИТК Система» работает над проектом создания модульных дата-центров на базе атомных электростанций. Пилотная площадка будет расположена на Нововоронежской АЭС, а до конца 2025 г. планируется расширение проекта на Балаковскую

¹⁷ Основной этап создания малой АЭС в Якутии стартует до конца 2024 года// Переток. URL: <https://peretok.ru/news/engineering/27729/> (дата обращения 27.01.2025).

и Смоленскую АЭС. Эти модульные ЦОД будут соответствовать требованиям Tier III по надежности и отказоустойчивости, что делает их подходящими для стратегически важных объектов. Одно из главных достоинств — это отсутствие необходимости в капитальном строительстве, что способствует быстрому развертыванию инфраструктуры.

Газпром, Сбербанк, Wildberries, Северсталь и другие крупные компании строят собственные крупные дата-центры для создания гибкой и эффективной ИТ-инфраструктуры, контроля и повышения уровня безопасности критически важных данных и соблюдения требований регуляторов.

В зарубежных странах работы по созданию ММР и их совмещению с дата-центрами идет с разной степени успешностью. Например, малый модульный реактор CAREM мощностью 27 МВт (Аргентина) находится на стадии завершения строительства и должен стать первым малым реактором в Аргентине, который будет введен в эксплуатацию¹⁸.

Концепции ММР в настоящее время рассматриваются в Соединенном Королевстве, например, компаниями Rolls-Royce и Holtec International. Например, Rolls-Royce планирует начать строительство первой в своем роде электростанции на базе ММР мощностью 470 МВт в 2026 г. и построить ее до 2030 г. В 2022 г. начался первый этап оценки конструкции ММР британскими регулирующими органами, а в 2023 г. компания перешла ко второму этапу — детальной оценки технических характеристик проекта¹⁹.

Holtec International подала заявку на общую оценку конструкции ММР SMR-300 в Великобритании. Проект находится на этапе предварительного лицензирования в Комиссии по ядерному регулированию США. Основной способ применения SMR-300 — производство электроэнергии с дополнительным когенерационным оборудованием (производство водорода, хранение тепловой энергии, централизованное теплоснабжение, опреснение морской воды).

Хотя проект SMR-160 (США) еще не завершен, компания NuScale Power планирует построить свой первый малый модульный реактор SMR-160 к 2029 г. Это будет один из первых сертифицированных ММР в США. Конструкция ММР компании NuScale уже получила добро на эксплуатацию от Управления ядерной энергии²⁰.

¹⁸ Argentina's CAREM SMR project to have Critical Design Review // World Nuclear News. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Critical-Design-Review-for-Argentina-s-CAREM-small> (accessed January 27, 2025).

¹⁹ Small Modular Reactors // Atomic Expert. URL: https://atomicexpert.com/small_modular_reactors (accessed January 27, 2025).

²⁰ Новые технологии для центров обработки данных // Eenergy Media. URL: <https://eenergy.media/news/27689> (дата обращения 27.01.2025).

В 2024 г. компания Amazon приобрела у Talen Energy кампус с ЦОД, работающий от атомной электростанции. Это соглашение дополняет ее усилия по использованию безуглеродной энергии для питания ЦОД по всему миру²¹.

Некоторые крупные ИТ-компании начали интегрировать мини-АЭС в свои энергетические стратегии. Например, Google подписала соглашение о сотрудничестве с корпорацией Nucor, чтобы помочь запустить усовершенствованные ядерные проекты²².

«Следующее поколение усовершенствованных ядерных реакторов предлагает новый путь для ускорения развертывания ядерной энергетики благодаря их упрощенной конструкции и надежной, неотъемлемой безопасности, – заявила Google. – Меньший размер и модульная конструкция могут сократить сроки строительства, обеспечить развертывание в большем количестве мест и сделать сроки реализации проекта более предсказуемыми»²³.

Компания Microsoft заключила соглашение с Constellation Energy о восстановлении реактора на станции Three Mile Island для обеспечения своих дата-центров необходимой энергией. Помимо этого в Microsoft появились новые вакансии, связанные с разработкой эффективных стратегий в сфере передовой ядерной энергетики. Microsoft ищет специалистов для разработки планов по использованию ММР для питания своих ЦОД²⁴.

Одна из крупнейших компаний в сфере ИТ, Oracle, проектирует центр обработки данных гигаваттной мощности, который будет питаться от трех небольших ядерных реакторов. Председатель совета директоров и директор по технологиям корпорации Oracle Лоуренс Эллисон считает, что спрос на электроэнергию, вызванный ИИ, становится настолько «безумным», что Oracle стремится обеспечить себя энергией с помощью ядерных технологий нового поколения, малые ядерные реакторы могут стать источником энергии в будущем — задача состоит в том, чтобы построить первый такой реактор²⁵.

²¹ Amazon goes nuclear, investing more than \$500 million to develop small modular reactors // CNBC. URL: <https://www.cnbc.com/2024/10/16/amazon-goes-nuclear-investing-more-than-500-million-to-develop-small-module-reactors.html> (accessed January 27, 2025).

²² Google, Microsoft and Nucor team up on clean energy // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Google,-Microsoft-and-Nucor-team-up-on-clean-energ> (accessed January 27, 2025).

²³ Google заключила договор на покупку электричества от малого модульного атомного реактора // RenErgo. URL: <https://rener.ru/google-zaklyuchila-dogovor-na-pokupku-elektrichstva-ot-malogo-modulnogo-atomnogo-reaktora/> (дата обращения 27.01.2025).

²⁴ Microsoft планирует возобновить работу атомной электростанции Three Mile Island, которая cut не стала причиной катастрофы // Shazoo. URL: <https://shazoo.ru/2024/09/21/160380/microsoft-planiruet-vozobnovit-rabotu-atomnoi-elektrostantsii-three-mile-island-kotoraia-cut-ne-stala-privinoi-katastrofy> (дата обращения 27.01.2025).

²⁵ Oracle is designing a data center that would be powered by three small nuclear reactors // CNBC. URL: <https://www.cnbc.com/2024/09/10/oracle-is-designing-a-data-center-that-would-be-powered-by-three-small-nuclear-reactors.html> (accessed January 27, 2025).

Швейцарский стартап Deep Atomic анонсировал планы по разработке компактного маломощного модульного реактора, который будет предназначен для обеспечения энергией растущего числа энергоемких ЦОД. Реактор МК60 на легкой воде представляет собой компактное и масштабируемое решение, соответствующее уникальным требованиям современных и будущих дата-центров, поддерживающих облачные сервисы, криптовалютные операции и приложения на основе ИИ. Каждое устройство будет способно генерировать до 60 МВт электроэнергии и предназначено для установки непосредственно в ЦОД²⁶.

Заключение. В результате анализа текущего состояния и перспектив создания ЦОДАЭ на основе ММР можно сделать несколько ключевых выводов.

Рост потребления электроэнергии в ЦОД, обусловленный развитием ИИ и увеличением объемов обрабатываемых данных, создает серьезные вызовы для энергетической инфраструктуры. Прогнозируется, что в ближайшие годы потребление энергии в дата-центрах вырастет значительно, что приведет к дефициту электроэнергии и повышению цен. И какие бы миллиарды долларов не закачивались в проекты по развитию ИИ, в конечном счете все ограничится лимитами имеющейся электроэнергии²⁷.

Атомная энергетика, особенно в виде ММР, представляет собой эффективное решение для обеспечения ЦОД экологически чистой и стабильной энергией. ММР обладают высокой плотностью энергии и могут работать круглосуточно, что делает их идеальными для нужд дата-центров.

Несмотря на очевидные преимущества использования ММР в ЦОД, существуют значительные барьеры для их внедрения. Это включает строгие нормативные требования и ограниченное количество проектов ММР. Эти факторы могут замедлить процесс разработки и внедрения таких технологий. В любом случае, успешная интеграция ММР в инфраструктуру ЦОД требует дальнейших исследований и подтверждения их эффективности. Важно учитывать как технические аспекты, так и общественное мнение при продвижении ядерной энергетике как решения для растущих потребностей в электроэнергии в цифровую эпоху.

²⁶ Nuclear startup unveils compact reactor specifically for data centres // NucNet. URL: <https://www.nucnet.org/news/nuclear-startup-unveils-compact-reactor-specifically-for-data-centres-10-1-2024> (accessed January 27, 2025).

²⁷ Трамп объявил о крупнейшем ИИ-проекте в истории на \$500 млрд // РБК. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/22/01/2025/6790abbc9a7947c418ec83f (дата обращения 27.01.2025).

Литература

- [1] Khosravi A., Sandoval O.R., Taslimi M.S., Sahrakorpi T., Amorim G., Pabon J.J.G. Review of energy efficiency and technological advancements in data center power systems. *Energy and Buildings*, 2024, vol. 323, art. no. 114834. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114834>
- [2] Zong J., Peng Y., Zhang B., Yin X. Research on Energy Consumption in Data Centers. *3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET)*. Chengdu, China, 2024, pp. 1732–1738. <https://doi.org/10.1109/ICEPET61938.2024.10626044>
- [3] Cha S. The potential role of small modular reactors (SMRs) in addressing the increasing power demand of the artificial intelligence industry: A scenario-based analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, vol. 56, art. no. 103314. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.11.016>
- [4] Lu J. Small Modular Reactors: A Viable Path to Sustainable Data Centers in the Age of Artificial Intelligence. *The Frontiers of Society, Science and Technology*, 2024, vol. 6, no. 11, pp. 58–62. <https://doi.org/10.25236/FSST.2024.061110>
- [5] Акимов А.М., Федорова С.А., Магдыч Е.А. К вопросу применения малых модульных реакторов. *Энергетические установки и технологии*, 2022, т. 8, № 1, с. 134–137.
- [6] Wang Y., Chen W., Zhang L., Zhao X., Gao Y., Dinavahi V. Small Modular Reactors: An Overview of Modeling, Control, Simulation, and Applications. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 39628–39650. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351220>
- [7] Poudel B., Gokaraju R. Small Modular Reactor (SMR) Based Hybrid Energy System for Electricity & District Heating. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/PESGM52003.2023.10253074>
- [8] Khan S.U., Almutairi Z., Almuzaiqer R. Technological readiness, fuel cycle analysis, levelized cost evaluation, and comparative assessment of very small modular reactors (vSMRs). *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, vol. 56, art. no. 103361. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103361>
- [9] Sainati T., Locatelli G., Smith N. Project financing in nuclear new build, why not? The legal and regulatory barriers. *Energy Policy*, 2019, vol. 129, pp. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.068>
- [10] Cho E., Lee J. Social acceptance of small modular reactor (SMR): Evidence from a contingent valuation study in South Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, vol. 57, no. 1, art. no. 103128. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.07.059>
- [11] [Сухобок А.М., Мысева Е.Р. Перспективы малых модульных реакторов. *Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой. V Междунар. студенческой науч. конф.: материалы*. Москва, НИЯУ МИФИ, 2023, с. 349–356.

- [12] Шульга Р.Н. Автономные малые модульные реакторы. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*, 2023, № 11, с. 45–52.
- [13] Locatelli G., Bingham C., Mancini M. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, vol. 73, pp. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>
- [14] Дьяков А.С. Малые модульные ядерные реакторы: перспективы развития. *Мировая экономика и международные отношения*, 2023, т. 67, № 6, с. 47–60. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2023-67-6-47-60>
- [15] Осинцева А.И. Малые модульные реакторы как альтернатива современным реакторным установкам. *XXVII Всерос. аспирантско-магистерского семинар: материалы*. Казань, КГЭУ, 2023, с. 62–65.
- [16] Сухов Р.Р., Амзараков М.Б., Исаев Е.А. Новые метрики энергоэффективности ИТ-отрасли. *Бизнес-информатика*, 2022, т. 16, № 2, с. 49–61. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.2.49.61>
- [17] Hernandez T., Sawyer J., Uebelacker H., Zuniga A., Demirhan H. Energy Efficiency in Data Center Management. *Congress in Computer Science*, Las Vegas, NV, USA, Computer Engineering & Applied Computing (CSCE), 2023, pp. 1214–1218. <https://doi.org/10.1109/CSCE60160.2023.00203>
- [18] Ahammed M.T., Osman N., Das C., Hossain M.A., Hossain S., Kaium M.H. Analysis of Energy Consumption for a Hybrid Green Data Center. *International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*. Chittagong, Bangladesh, 2022, pp. 318–323. <https://doi.org/10.1109/ICISSET54810.2022.9775899>
- [19] Черных А.П., Михаленко В.А. Внедрение газотурбинных технологий в цифровые проекты России путем энергоснабжения центров обработки данных (ЦОД) и майнинговых ферм. *Перспективные задачи инженерной науки. XIV Междунар. науч. форум: сб. ст.* Москва, ИЦ «Импульс», 2023, с. 352–362.
- [20] Иванченко И.Д., Леонов В.А. Малые модульные реакторы. *Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем. II Всерос. науч.-практ. конф.: материалы*. Санкт-Петербург, ВШТЭ СПбГУПТД, 2023, с. 133–138.
- [21] Терская А.А., Вилданов Р.Р. Ядерные модульные реакторы. *Тенденции развития науки и образования*, 2024, № 2, с. 224–226. <https://doi.org/10.18411/trnio-02-2024-652>

Поступила в редакцию 07.05.2025

Шевалдина Елена Ивановна — кандидат социологических наук, доцент, кафедра «Региональная экономика и управление», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация.

Шевалдина Ксения Станиславовна — студентка 2-го курса обучения, Институт физики ФГАОУ ВО КФУ, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шевалдина Е.И., Шевалдина К.С. Анализ малых модульных реакторов в энергосистемах центров обработки данных. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/tech_org_const/eco_man/1057.html

INFRASTRUCTURE OF THE FUTURE: NEW APPROACHES TO BUILDING DATA CENTERS USING SMALL MODULAR REACTORS

E.I. Shevaldina¹

Shevaldinalena@mail.ru

K.S. Shevaldina²

ks090106@mail.ru

¹ *Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation*

² *Institute of Physics, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation*

In the context of increasing electricity consumption caused by the development of artificial intelligence and increasing amounts of data, data processing centers (data centers) face serious challenges in ensuring stable energy supply. Nuclear power engineering, especially low-power modular reactors (MMRs), is a promising solution capable of providing data centers with reliable and environmentally friendly energy. The article discusses the necessity, prerequisites, advantages, and difficulties of building nuclear-powered data centers by integrating MMR into the data center infrastructure, as well as potential solutions to ensure sustainable energy supply. Publications in scientific journals and online publications related to the research topic were used as research material. In the extended search, 126 sources were studied. A further limitation on the time of writing from 2024 to the present, the exclusion of sources with a retelling of primary sources has narrowed the search area to 27. The research methods used were theoretical methods of studying sources and literature: analysis, synthesis, induction, deduction, content analysis, comparative analysis and modeling. It is proposed to solve the problem of data center energy consumption by using MMR in the construction of data centers, which have a number of advantages: low carbon dioxide emissions, small physical presence, stable and reliable power supply, high economic efficiency. There are difficulties associated with the construction of data centers, such as regulatory barriers, public opinion, the limited number of available MMRs, and the problem of waste disposal. There are already examples of mini-nuclear power plants in the world that can be considered as a platform for creating MMR as part of a data center, such as the Akademik Lomonosov floating NPP in Russia and the HTR-PM modular reactor in China. The use of small modular reactors in data centers is a promising solution to ensure reliable and environmentally friendly energy supply.

Keywords: data processing center, data center, artificial intelligence, low-power modular reactor, energy supply, energy shortage, construction, nuclear energy

Received 07.05.2025

Shevaldina E.I. — Ph. D. (Soc.), Associate Professor, Department of Regional Economics and Management, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation.

Shevaldina K.S. — 2nd year Student, Institute of Physics, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Shevaldina E.I., Shevaldina K.S. Infrastructure of the future: new approaches to building data centers using small modular reactors. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/tech_org_const/eco_man/1057.html