



УДК 622.013

## ЭНЕРГЕТИКО-ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЦИИ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС УГОЛЬНЫХ РЕГИОНОВ

Варнавский К. А.<sup>1</sup>, Ермаков А. Н.<sup>1</sup>, Смирнова А. Д.<sup>1,2</sup>, Тришкин Ф. А.<sup>3</sup>,  
Заславский И. С.<sup>1,4</sup>, Хорешок А. А.<sup>1</sup>, Лебедев Г. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

<sup>2</sup> Шаньдунский университет науки и технологий

<sup>3</sup> ООО «Пауэр Протекшн Сервис»

<sup>4</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина



### Информация о статье

Поступила:

08 октября 2025 г.

Рецензирование:

12 января 2026 г.

Принята к печати:

24 февраля 2026 г.

### Ключевые слова:

угольный регион, центр  
обработки данных,  
энергетическая интеграция,  
промышленная  
инфраструктура, критически  
важная информационная  
инфраструктура,  
моделирование,  
трансформация отрасли

### Аннотация.

Актуальность исследования обусловлена структурным кризисом угольной отрасли, снижением мирового и внутреннего спроса на энергетический уголь, а также необходимостью диверсификации экономики угледобывающих регионов. В этих условиях особую значимость приобретает переосмысление роли промышленной и энергетической инфраструктуры, создававшейся для нужд добывающих предприятий. Одним из перспективных направлений является размещение центров обработки данных (ЦОД), относящихся к объектам критической информационной инфраструктуры, на площадках, высвобождающихся по мере снижения объемов добычи угля. Целью работы является разработка концепции энергетико-инфраструктурной модели интеграции ЦОД в промышленный комплекс угольных регионов. Предлагаемый подход основан на инженерно-аналитическом моделировании, включающем оценку потенциала дегазации угольных пластов, анализ энергетических потоков, моделирование режимов электроснабжения и исследование устойчивости инфраструктуры в долгосрочной перспективе. Рассматриваются возможности использования метана, извлекаемого при дегазации, для генерации электроэнергии, а также перспективы комбинированного применения традиционных и возобновляемых источников энергии при организации автономных и распределенных систем электроснабжения. В результате сформулированы принципы построения функциональной модели, отражающей взаимосвязь геолого-технических, энергетических и инфраструктурных факторов при размещении ЦОД. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации промышленных площадок, разработке региональных программ технологической трансформации и долгосрочном планировании развития энергетических систем угольных регионов, обеспечивая научно-техническую основу для перехода к устойчивому и высокотехнологичному типу промышленного развития.

**Для цитирования:** Варнавский К.А., Ермаков А.Н., Смирнова А.Д., Тришкин Ф.А., Заславский И.С., Хорешок А.А., Лебедев Г.М. Энергетико-инфраструктурные модели интеграции центров обработки данных в промышленный комплекс угольных регионов // Техника и технология горного дела. – 2026. – №1(32). – С. 4-26. – DOI: 10.26730/2618-7434-2026-1-4-26, EDN: QDJKPT



## **Введение**

Современная угольная отрасль находится в фазе глубоких структурных изменений, вызванных сочетанием внешних и внутренних факторов: изменением географии спроса, логистическими ограничениями, ростом транзитных тарифов и ужесточением экологического регулирования. Эти процессы привели к перераспределению экспортных потоков и к необходимости переосмысления роли традиционных угледобывающих территорий в национальной экономике [1]. Аналитики указывают на значительную перебалансировку поставок на новые рынки и на волатильность экспортных доходов, что усиливает риски для регионов-производителей и требует поиска направлений диверсификации региональной экономики.

В то же время в энергетике и информационных технологиях наблюдается устойчивый рост спроса на вычислительные мощности и на соответствующую инфраструктуру – ЦОД [2]. По оценке Международного энергетического агентства (IEA), на деятельность ЦОД приходится порядка 1,5 % мирового потребления электроэнергии (около 415 ТВт·ч в 2024 г.), а потребность в энергии, связанная с ИИ, эволюцией вычислительных ресурсов и высокопроизводительными вычислениями, продолжает быстро расти [3]. Это создает как вызовы, так и возможности для регионов с избыточными энергетическими мощностями или с доступом к локальным энергоресурсам.

В российских условиях сочетание депозитарного потенциала угольных бассейнов и существующей энергетической и промышленной инфраструктуры представляет интерес для размещения энергоемкой инфраструктуры ЦОД. При этом такие проекты невозможно рассматривать исключительно как ИТ-инициативу: ЦОД следует рассматривать как инженерно-технические комплексы со строгими требованиями к электроснабжению, охлаждению, пожарной безопасности и физической устойчивости сооружений. В 2024-2026 гг. российское законодательство стало уделять ЦОД [4–7] специальное внимание: в Федеральном законе № 244-ФЗ (23.07.2025) закрепляется понятие ЦОД и предусматривается ведение реестра, принятая в июле 2025 г. редакция закона «О связи» устанавливает новые правовые рамки для строительства и функционирования ЦОД в России [7]. Эти нормативные изменения повышают правовую определенность при реализации проектов по размещению ЦОД в регионах.

Важным аспектом выбора промышленных площадок для размещения ЦОД является близость к источникам энергии и коммуникациям. Практика показывает, что размещение масштабных ЦОД вблизи с генерацией минимизирует потери при передаче электроэнергии и повышает общую энергоэффективность ЦОД [8]. Другой немаловажный фактор – использование благоприятного климата. Размещение ЦОД в холодных регионах позволяет максимально использовать свободное охлаждение [9]. Развитие модульных архитектур привело к появлению различных типов ЦОД: промышленные ЦОД, позволяющие настраивать системы питания и охлаждения, а также модульно расширять инфраструктуру; контейнерные, пригодные для быстрого размещения в удаленных регионах [10]. Современные тенденции в размещении ЦОД демонстрируют отход от традиционных монолитных конструкций в пользу гибких, модульных, высокорезервированных и энергоэффективных решений, адаптированных к специфическим условиям эксплуатации, включая подземную среду и промышленные площадки, с акцентом на минимизацию капитальных и операционных затрат и повышение устойчивости [10].

Одновременно для угольных регионов характерно наличие больших объемов нетрадиционных источников углеводородов, а именно угольного метана (Coalbed Methane – СВМ или Coal Mine Methane – СММ), который в ряде случаев извлекается в процессе дегазации и может быть использован как топливо для когенерационных установок или газопоршневых электростанций. Оценки ресурсов Кузбасса указывают на существенные объемы метана, при этом практические возможности его использования зависят от концентрации газа и технологической схемы извлечения [11]. Эффективная интеграция генерации на основе дегазационного метана с ЦОД может обеспечить локальную автономность и снизить углеродный след при условии учета газохимических характеристик потока и инженерных ограничений.

Именно инженерные аспекты – геотехнические, энергетические и инфраструктурные – лежат в центре рассматриваемой проблемы. Размещение ЦОД в пределах промышленных



территорий угольных регионов (включая подземные и полуподземные решения на базе выработанных шахтных площадей) требует учета геомеханических рисков, особенностей вентиляции, пылевой нагрузки, теплового режима и взаимодействия с существующими системами электроснабжения [12]. Зарубежный опыт показывает, что проекты по размещению ЦОД в шахтах или на площадках, ранее используемых для добычи, реализуемы, но требуют специализированных инженерных решений [13]: примеры Lefdal Mine Datacenter (Норвегия) и проекты, исследующие подземное размещение с использованием геотермальных и вентиляционных систем, демонстрируют преимущества по безопасности и охлаждению, а также сложность технической адаптации [14]. В данной статье [15] рассматриваются вопросы инженерного обоснования установки ЦОД в угледобывающих регионах с использованием местных ресурсов. В документе [16] рассматриваются преимущества диверсификации районов добычи полезных ископаемых для развития информационной инфраструктуры. Научные исследования последних лет подтверждают важность моделирования теплообмена, взаимодействия вентиляции и геотермии и применения цифровых двойников для оценки эксплуатационных режимов подобных объектов.

С учетом изложенного возникает необходимость разработки интегрированной методологии инженерного проектирования и оценки устойчивости таких объектов – методологии, которая объединяет: (1) горно-геологическое моделирование (выделение наиболее продуктивных пластов и спутников в геологическом разрезе, прогнозная оценка значений газоносности угольных пластов, оценка ресурсов метана, устойчивость вмещающих горных пород) [17]; (2) энергетическое моделирование (сценарии выработки и распределения энергии среди промышленных потребителей и ЦОД, состав генерирующего оборудования, схемы когенерации/тригенерации, роль ВИЭ и накопителей, бесперебойное питание); (3) инфраструктурно-строительное проектирование (оценка площадок, требования к охлаждению и вентиляции, безопасность и резервирование, водоотведение, вентиляция, газоотвод, связь); (4) цифровую платформу сценарного анализа (цифровые двойники, модули оценки надежности и технико-экономические критерии). Эффективное проектирование и оценка устойчивости объектов ЦОД требует интеграции разнородных моделей и данных в единой цифровой среде. Такой междисциплинарный подход позволяет перейти от разовой технико-экономической оценки к динамическому инструменту долгосрочного планирования развития региона с учетом внешних факторов: волатильность цен на уголь и энергоносители, изменения нормативных требований и темпов внедрения ВИЭ [18].

Важно подчеркнуть, что направление интеграции ЦОД в угольные регионы имеет не только инженерно-техническую, но и социально-экономическую значимость [19, 20]: правильная адаптация инфраструктуры способна смягчить социальные последствия сокращения добычи, сохранить профильные рабочие места и сформировать новые производственные цепочки, основанные на цифровых сервисах и высокопроизводительных вычислениях. Однако эти эффекты достижимы лишь при условии строгого инженерного обоснования проектов, учитывающего локальные ресурсы, безопасность и устойчивость систем. Именно поэтому в настоящей работе акцент делается на разработке инженерно-аналитической основы энергетико-инфраструктурной модели интеграции ЦОД – как необходимой предпосылки для последующей экономической и управленческой проработки сценариев трансформации угольных регионов.

На основании обзора нормативной базы, международных исследований и практик размещения ЦОД в промышленных и подземных условиях формулируется цель данной статьи: разработать концептуальную и методическую основу для построения функциональной энергетико-инфраструктурной модели, обеспечивающей технико-инженерное обоснование размещения ЦОД в промышленном комплексе угольных регионов и позволяющей осуществлять сценарный анализ долгосрочной устойчивости таких решений. В последующих разделах статьи будет представлен детальный разбор подсистем модели, блок-схема взаимодействий, описание ключевых входных параметров и предварительное обсуждение возможных сценариев развития на примере региональных особенностей (в частности, условий Кузбасса).

## Общая концепция

Концепция энергетико-инфраструктурной интеграции ЦОД в промышленный комплекс угольного региона выработана на основе анализа как инженерных процессов, так и примеров международных практик. При проектировании модели учитывается факт, что ранее успешные схемы демонстрируют возможность размещения ЦОД на площадках шахт или закрытых угольных предприятиях: к примеру, исследование, в котором подземное или полуподземное размещение дата-центров в выработках угольных пластов обеспечивало снижение энергозатрат на охлаждение, подтверждает инженерную реализуемость подобных решений [21, 22]. Также зарубежные публикации по цифровым двойникам и моделированию подземных объектов показывают, что интеграция вычислительных мощностей с горной инфраструктурой становится не просто концепцией, но инженерной практикой, требующей координации между геотехническими, энергетическими и техническими подсистемами [22].

Исходя из этого, модель составлена таким образом, чтобы охватить весь технологический цикл: от оценки ресурсной базы (дегазация угольных пластов и использование метана) до инженерного размещения ЦОД, через энергетическую систему и инфраструктурное обеспечение. В результате формируется блок-схема, отражающая логическую последовательность подсистем, каждая из которых выполняет функцию, критичную для интеграции объектов КИИ в региональную энергетико-инфраструктурную среду.

На Рис. 1 представлена концептуальная структура модели, включающая геологическую подсистему, энергетическую подсистему, инфраструктурную подсистему, блок «ЦОД» и модуль устойчивости и сценарного анализа.

Геологическая подсистема задает ресурсную базу и динамику добычи и дегазации, энергетическая подсистема выстраивает сценарии генерации и распределения энергии, инфраструктурная подсистема учитывает пространственные, технические и инженерные ограничения размещения объектов, подсистема ЦОД рассматривается как функциональный элемент энергосистемы – потребитель, источник вторичного тепла и активный участник распределения нагрузки, а модуль устойчивости и сценарного анализа обеспечивает адаптацию всей системы к изменяющимся внешним условиям, таким как цена на энергоресурсы или доля возобновляемых источников.

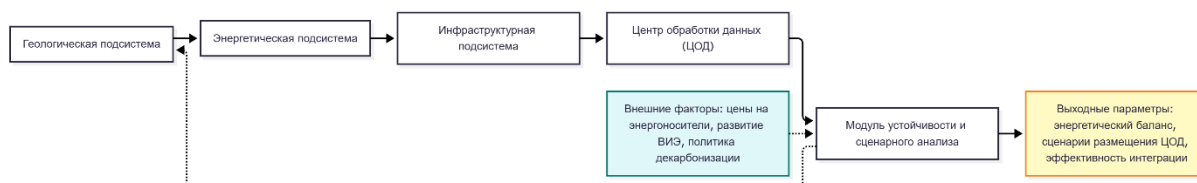


Рис. 1. Структурная модель энергетико-инфраструктурной интеграции ЦОД  
Fig. 1. Structural model of energy-infrastructure integration of a data center

Таким образом, представляемая концепция создает инженерно-техническую основу для дальнейшей детализации каждой подсистемы и раскрытия их границ и параметров в следующих разделах статьи.

### Геологическая подсистема

Повышение эффективности геологоразведочных работ требует перехода от традиционных схем к интеллектуально управляемым процессам, основанным на интеграции инновационных технологий (Рис. 2). Такой подход обеспечивает сквозную цифровизацию основных этапов геологоразведки, развитие методов моделирования природных систем, оптимизацию буровых и дегазационных операций, а также повышение экологической устойчивости функционирования минерально-сырьевого комплекса.

Одним из ключевых направлений развития геологической подсистемы является рациональное использование метана угольных пластов (МУП). Его утилизация позволяет одновременно решать задачи снижения выбросов парниковых газов и вовлечения дополнительного энергетического ресурса в хозяйственный оборот. В частности, использование метана в качестве топлива для центров обработки данных (ЦОД) формирует энергетическую основу децентрализованных цифровых систем управления. В результате геологическая

подсистема приобретает двойную функцию, выступая источником как энергетических, так и цифровых ресурсов, что обеспечивает синергию задач декарбонизации, промышленной безопасности и энергоэффективности.

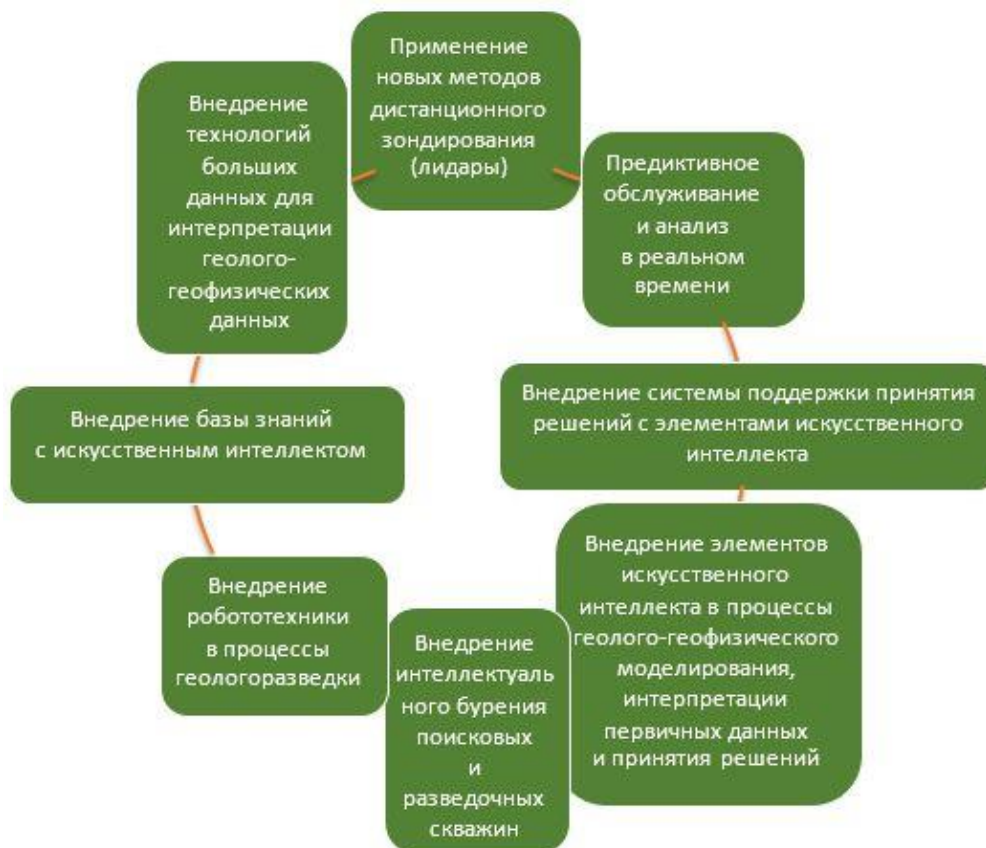


Рис. 2. Схема инновационных технологий для геологоразведки [23]  
Fig. 2. Diagram of innovative technologies for geological exploration [23]

Кузбасс – ведущий угледобывающий регион России с оцененными ресурсами метана свыше 13 трлн м<sup>3</sup> [24]. При этом 80% балансовых запасов угля подлежат подземной разработке, что предопределяет необходимость обязательной дегазации высокогазоносных пластов (Рис. 3). В соответствии с действующими нормативными требованиями [25] дегазация обязательна при метаноносности более 9 м<sup>3</sup>/т с.б.м. и для всех пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа. В этих условиях параметры метаноносности, газодинамического режима и эффективности дегазации становятся определяющими характеристиками геологической подсистемы.

Дополнительным фактором, усиливающим значимость комплексного освоения угольных месторождений, является ратификация Киотского протокола и развитие международных требований по сокращению углеродного следа. По данным отчета [27], основная доля выбросов парниковых газов приходится на углекислый газ, связанный с добычей и переработкой топливно-энергетических ресурсов (Рис. 4), при существенном вкладе метана в структуру эмиссий.

В условиях ужесточения экологических требований к экспортируемой продукции российские угледобывающие предприятия вынуждены внедрять энерго- и ресурсосберегающие решения, обеспечивающие конкурентоспособность на азиатских рынках. Анализ международной практики по утилизации угольного метана показывает, что в настоящее время реализуются три основных направления: выпуск вентиляционного метана в атмосферу (низкие концентрации), факельное сжигание и целевое извлечение с последующим использованием как топлива (Рис. 5).

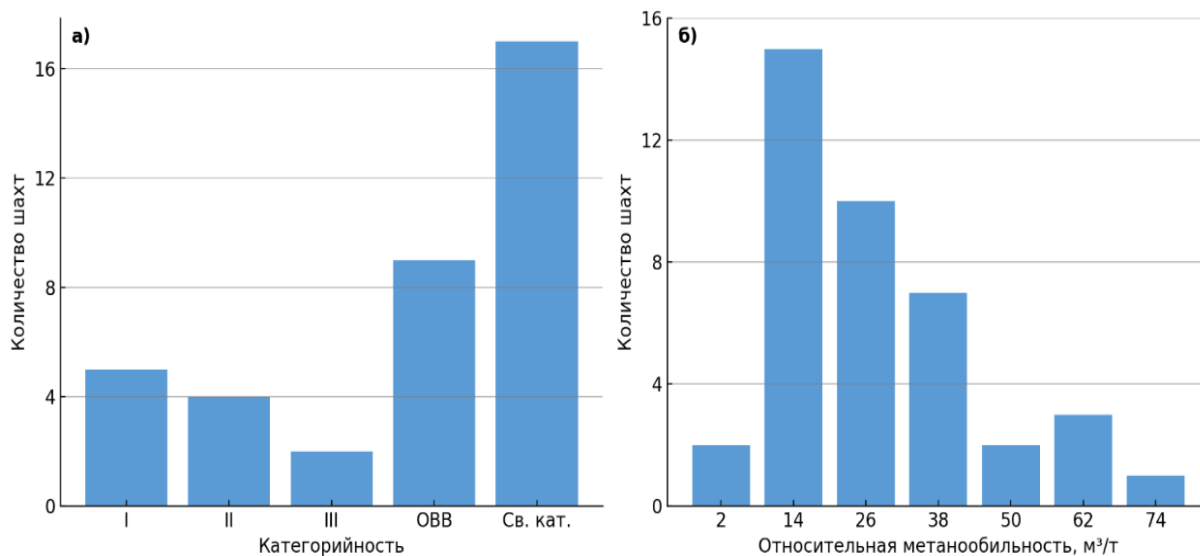


Рис. 3. Классификация угольных шахт Кузбасса по категориям и относительной метанообильности [26]

Fig. 3. Classification of Kuzbass coal mines by category and relative methane productivity [26]



Рис. 4. Выбросы парниковых газов, связанных с потреблением топливно-энергетических ресурсов, за 2023 год [27]

Fig. 4. Greenhouse gas emissions associated with fuel and energy resource consumption in 2023 [27]

С точки зрения инженерии, выбор технологии утилизации метана определяется качеством и концентрацией газа, которые существенно варьируются в зависимости от источника:

- метан исходящей вентиляционной струи – Ventilation Air Methane (VAM): с концентрацией  $\text{CH}_4$  до 1%;
- шахтный метан – Coal Mine Methane (CMM): с концентрацией  $\text{CH}_4$  25–80%;
- МУП, метан из неразгруженных угольных пластов, извлекаемый с помощью скважин, пробуренных с поверхности – Coalbed Methane (CBM): с концентрацией  $\text{CH}_4$  80–95%.

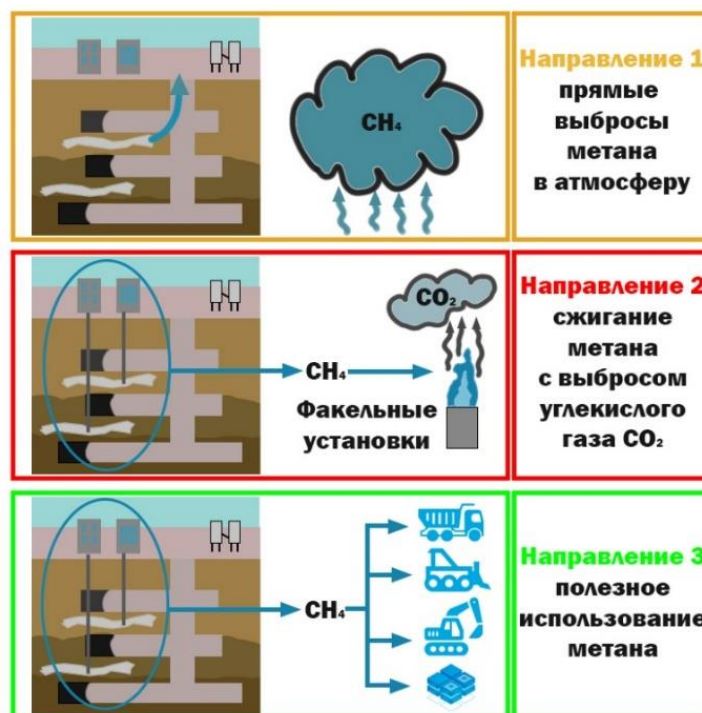


Рис. 5. Современные способы утилизации угольного метана в рамках глобальных проектов [28]

Fig. 5. Modern methods of coal-mine methane utilization in global projects [28]

Современные тренды устойчивого развития предполагают переход к низкоуглеродной экономике, что требует количественной оценки углеродного следа и мониторинга выбросов. Рациональная утилизация шахтного метана или МУП как топлива для ЦОД обеспечивает замкнутый энергетический цикл и снижает углеродную нагрузку на регион. Геологическая подсистема, интегрированная в цифровую инфраструктуру, становится основой для формирования энергетико-цифровых кластеров, объединяющих добычу, переработку и хранение данных. Ключевые параметры геологической подсистемы, которые необходимо включить в модель как входные данные и ограничивающие условия, представлены в Таблице 1.

### Энергетическая подсистема

Энергетическая подсистема в рамках интеграционной модели представляет собой объединенную структуру всех доступных источников и инфраструктуры генерации, передачи и распределения энергии на территории угольного региона. В нее включаются традиционные тепловые мощности (ТЭЦ, котельные), установки на природном газе, газопоршневые и газотурбинные модули, системы утилизации метана (СММ / СВМ), возобновляемые источники энергии (солнечные, ветряные, гидро), системы накопления энергии (СНЭЭ) и резервы, освобождаемые при остановке горных производств. Такое расширенное представление позволяет моделировать полный энергобаланс региона и оценивать варианты комбинированного энергоснабжения для ЦОД с учетом как существующего парка мощностей, так и перспективного ввода генерации.

Текущее состояние характеризуется преобладанием крупных централизованных ТЭЦ и распределительных подстанций, ориентированных на покрытие потребностей угледобывающей промышленности. Снижение объемов добычи и частичное закрытие предприятий формируют резервную инфраструктуру – линии, подстанции, трансформаторы и вспомогательные мощности – которая может быть переориентирована на обслуживание новых потребителей, в том числе ЦОД. Параллельно развивается практика [29] проектирования гибкой энергетической структуры энергоснабжения ЦОД в локальных энергосистемах, что позволяет повысить



устойчивость и снизить зависимость от традиционных дизель-резервов при помощи ВИЭ и накопителей. Опыт и методики проектирования таких систем подробно рассмотрены в исследованиях по интеграции ЦОД с локальными энергосистемами [30].

Таблица 1. Параметры, характеризующие геологическую подсистему модели  
Table 1. Parameters characterizing the geological subsystem of the model

Группа параметров	Пример параметров	Значение для модели
Геолого-технологические	глубина и мощность пластов, проницаемость, метаноносность, геомеханические параметры	определяют режимы дегазации и извлечения метана
Газодинамические	концентрация $\text{CH}_4$ , дебит скважин, скорость метановыделения, газоотдача пласта	формируют энергетический потенциал и сценарии утилизации
Экологические	объем ПГ выбросов, углеродный эквивалент, показатели утилизации $\text{CH}_4$	обеспечивают учет в системах устойчивого развития
Инфраструктурные	расположение шахт и скважин, транспортная и энергетическая доступность	задают границы интеграции с энергетической подсистемой
Цифровые	данные геомониторинга, 3D-модели геологической среды, цифровые двойники объектов и средств дегазации	обеспечивают интеграцию с ЦОД и ИИ-моделями анализа

Перспективы развития энергетической подсистемы ориентированы на формирование гибридных конфигураций, сочетающих локальную генерацию на угольном метане и природном газе, ВИЭ, когенерационные и тригенерационные установки, а также накопители энергии и интеллектуальные системы управления нагрузкой. Для ЦОД такие схемы обеспечивают надежность энергоснабжения и уменьшение амплитуды колебаний выдачи мощности, а для региона – снижение углеродного следа и более эффективное использование существующих активов, создание углеродно-нейтральных ЦОД. В литературе по утилизации угольного метана [31] и по проектам «умных энергоузлов» выделяются схемы, где метан используется в газопоршневых установках или в тригенерации, а отходящее тепло направляется на нужды производств и на охлаждение/обогрев инфраструктуры ЦОД. В статье [32] представлены политико-технологические инструменты электроснабжения и снижения углеродного следа ЦОД, в частности, акцентируется внимание на углеродном рынке как на важном политическом инструменте для экономически эффективной компенсации выбросов  $\text{CO}_2$ . Также рассматриваются технологические стратегии, такие как увеличение доли ВИЭ и повышение энергоэффективности, что позволяет достичь углеродной нейтральности ЦОД.

При проектировании и моделировании энергетической подсистемы важна опора на типовые решения в проектировании гибридных автономных энергокомплексов: сбор и формирование базы профилей нагрузки, учет стохастичности ВИЭ-генерации, моделирование алгоритмов перехода режимов от ведомого сетью в ведущий и наоборот у инверторов накопителя, а также оценка экономико-технической целесообразности конфигураций [33]. Применение цифровых двойников и алгоритмов оптимального управления повышает качество прогнозов и позволяет проводить анализ надежного энергоснабжения энергосистемы при аварийных сценариях или резком падении дебита метана. Ключевые параметры энергетической подсистемы, которые необходимо включить в модель как входные данные и ограничивающие условия, представлены в Таблице 2.



Таблица 2. Параметры, характеризующие энергетическую подсистему модели  
Table 2. Parameters characterizing the energy subsystem of the model

Группа параметров	Пример параметров	Значение для модели
Парк генерации	установленная мощность ТЭЦ, мини-ТЭЦ, газопоршневых установок, ГРЭС; тип топлива (уголь/природный газ/СММ и СВМ/ВИЭ)	определяет доступный ресурс и возможности резервирования
Потенциал угольного метана	объем извлекаемого метана ( $\text{м}^3/\text{год}$ ), концентрация $\text{CH}_4$ (%), дебиты скважин ( $\text{м}^3/\text{сут}$ )	формирует объем локальной газовой генерации и режимы ее использования
Доступность сетей и резервы	пропускная способность линий, трансформаторов, свободные мощности от остановленных предприятий	влияет на возможности подключения ЦОД и распределение нагрузок
ВИЭ и накопители	установка ФЭС (кВт), ветроэнергетика (кВт), емкость СНЭЭ (кВт·ч), параметры заряд/разряд, c-rate	задают гибкость и буферизацию энергопотоков
Тепловой потенциал и утилизация	мощность когенерации, доступный тепловой поток, эффективность рекуперации	обеспечивает схемы охлаждения/утилизации тепла ЦОД (тригенерация)
Профили нагрузки	суточные и сезонные профили ЦОД, производственные нагрузки шахт	позволяют синхронизировать генерацию и потребление
Надежность и резервирование	требования PUE, уровни резервирования (N, N+1), MTBF/MTTR для генераторов	критично для обеспечения непрерывной работы ЦОД
Экологические параметры	выбросы $\text{CO}_2$ экв., коэффициенты эмиссии при сжигании шахтного метана и газа	используются в оценке устойчивости и сценариях декарбонизации
Экономические входы	цены на уголь, природный газ, тарифы на электроэнергию, CAPEX/OPEX	требуются для технико-экономического анализа сценариев

Для обоснования инженерных подходов и методик при моделировании энергетической подсистемы использованы руководящие и обзорные публикации по типовым решениям автономных энергокомплексов и интеграции ЦОД, а также исследования и обзоры по утилизации угольного метана: руководства NREL по локальным энергосистемам; исследования, посвященные гибкому взаимодействию высоковычислительных ресурсов с энергосистемой; концепция «умных энергоузлов» угольных регионов; обзоры по тригенерации на угольном метане; а также недавние работы по оптимизации распределенных энергетических систем и по умным энергохабам.

### Инфраструктурная подсистема

Инфраструктурная подсистема образует пространственно-инженерную основу интеграционной модели и определяет практическую возможность размещения и эксплуатации энергетических и цифровых объектов в пределах промышленного комплекса. Она включает [12, 34–36] транспортные и логистические коридоры, электрические и тепловые сети, газо- и водоснабжение, телекоммуникационные магистрали, подготовленные промышленные площадки



и подземные выработки. В условиях трансформации угольных регионов высвобождаемые участки инфраструктуры представляют собой ресурс для формирования новых «энергетико-цифровых» кластеров; целесообразность такого переоснащения подтверждается примерами подземного и реновированного размещения ЦОД в зарубежной практике, где бывшие промышленные и горные объекты используются для повышения физической безопасности и снижения затрат на охлаждение и строительство.

Внутри таких кластеров инфраструктура ЦОД представляет собой сложный многоуровневый комплекс, который помимо внешних коммунальных и логистических систем включает ряд критически важных внутренних подсистем, обеспечивающих непрерывную работу высоковычислительных технологий. Эти подсистемы традиционно группируются вокруг трех ключевых функциональных областей [37] – электроснабжения, сетевого взаимодействия и управления тепловыми режимами, дополняемых вспомогательными системами безопасности, мониторинга и управления.

Особое значение имеет способность инфраструктуры обеспечить надежное подключение высокоэнергоемких объектов и резервирование их питания: схема систем распределения электроэнергии, доступность линий электропередачи, емкость трансформаторных подстанций, возможность использования существующих котловых и ТЭЦ-мощностей, а также оптоволоконных каналов связи. Высвобождение резервов от останавливаемых горных производств создает реальные технические возможности для переназначения сетевых мощностей и ускоренной интеграции ЦОД на имеющихся площадках. В сочетании с географическим преимуществом (удаленность от государственных границ и крупных мегаполисов) это формирует благоприятные условия для размещения объектов критической информационной инфраструктуры с повышенным уровнем физической и кибербезопасности [38].

Перспективы развития инфраструктурной подсистемы [38] связаны с деятельностью по адаптивной реновации промышленных территорий: реконструкция подстанций, модернизация кабельных трасс, подготовка площадок с необходимыми инженерными сетями, а также создание систем утилизации и распределения тепла с учетом рекуперации тепловой энергии от ЦОД. Практические подходы к подобной трансформации подтверждаются международными проектами и аналитическими обзорами, указывающими на экономическую и экологическую выгоду повторного использования инфраструктуры бывших угольных и промышленных объектов.

Ключевые параметры инфраструктурной подсистемы, которые необходимо включить в модель как входные данные и ограничивающие условия, представлены в Таблице 3.

### **Подсистема центров обработки данных (ЦОД)**

ЦОД в интеграционной модели выступает не только как потребитель энергии и информационный узел, но и как активный элемент энергетико-инфраструктурной системы, обеспечивающий цифровое управление и вторичное использование тепловой энергии. В контексте трансформации угольных регионов ЦОДы становятся ключевыми элементами критической цифровой инфраструктуры, интегрированными с промышленными и энергетическими объектами. Их роль заключается в обеспечении вычислительных мощностей для систем мониторинга, моделирования, цифровых двойников и интеллектуальных систем управления технологическими процессами.

Современные принципы проектирования ЦОД включают модульность и масштабируемость [10, 37], энергоэффективность [39] и возможность размещения вблизи источников генерации. Наиболее устойчивые решения реализуются по принципу, когда вычислительные мощности локализованы вблизи энергетических кластеров, минимизируя сетевые потери и повышая автономность функционирования. В международной практике реализованы примеры ЦОД, работающих на возобновляемых источниках и рекуперированном тепле: Lefdal Mine Datacenter (Норвегия) использует охлаждение морской водой и размещен в бывшей шахте; Green Mountain DC (Ставангер) работает полностью на гидроэнергии; проект Arctic World Archive (Шпицберген)



демонстрирует преимущества подземного размещения с точки зрения физической безопасности и энергоэффективности.

Таблица 3. Параметры, характеризующие инфраструктурную подсистему модели  
Table 3. Parameters Characterizing the Infrastructure Subsystem of the Model

Группа параметров	Пример параметров	Значение для модели
Транспортно-логистические объекты	протяженность дорог, наличие ж/д ветвей, подъездных путей, логистических терминалов	определяют доступность и стоимость логистики для новых производств
Электро- и теплосети	протяженность линий, трансформаторные мощности, свободная пропускная способность	влияют на возможности подключения ЦОД и энергоемких объектов
Газо- и водоснабжение	давление и дебит сетей, доступность резервуаров и скважин	задают ограничение для когенерации и систем охлаждения
Связь и цифровая инфраструктура	пропускная способность каналов, уровень резервирования, наличие узлов связи	определяют качество и надежность работы ЦОД
Земельные и промышленные площадки	площадь, инженерная подготовка, наличие коммуникаций, юридический статус	влияют на выбор площадок для размещения новых объектов
Состояние и износ	коэффициент износа зданий и сетей, год последней реконструкции	используются при моделировании затрат на восстановление
Интеграционные возможности	степень сопряженности с энергетической подсистемой и цифровыми платформами	определяют потенциал для создания «умных» промышленных кластеров
Экологические ограничения	зоны санитарной защиты, загрязненность, риск подтопления	учитываются при сценарном планировании и выборе площадок
Теплообменный потенциал	возможность использования отвалов, шахт, водоемов для охлаждения	важен при проектировании энергоэффективных ЦОД
Капитальные и эксплуатационные затраты	оценка CAPEX/OPEX по видам объектов	служат для сравнения сценариев реконструкции и нового строительства

Для российских условий примером крупного узла с высокой степенью отказоустойчивости и энергоэффективности является ЦОД Яндекс М9 (Москва), где реализованы схемы избыточного электропитания и утилизации тепловых выбросов для систем отопления. Однако в отличие от столичных площадок интеграция ЦОДов в промышленные кластеры угольных регионов позволяет достичь не только технологического, но и стратегического эффекта – перераспределения вычислительных мощностей, повышения географической диверсификации и устойчивости национальной КИИ.

Особое внимание при проектировании подсистемы ЦОД должно уделяться параметрам энергоэффективности (Power Usage Effectiveness, PUE), коэффициенту использования рекуперированного тепла (Energy Reuse Factor, ERF), резервированию сетей электропитания и каналов связи, возможностям гибридной генерации и систем хранения энергии. ЦОДы,



интегрированные в энергетико-инфраструктурную систему региона, могут выполнять функции балансировки нагрузки и потребления, участвуя в событиях управления спросом, а также обеспечивать тепловую подпитку систем централизованного отопления или промышленных тепловых процессов.

С точки зрения моделирования подсистема ЦОД должна включать в себя параметры, характеризующие размещение, тип и конфигурацию оборудования, энергетические и тепловые потоки, а также показатели надежности и доступности. Важно учитывать возможность масштабирования вычислительных мощностей и сценарии их распределения во времени с учетом изменения потребностей цифровой экономики и структуры энергобаланса региона. Ключевые параметры подсистемы ЦОД, которые необходимо включить в модель как входные данные и ограничивающие условия, представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Ключевые параметры подсистемы ЦОД  
Table 4. Key Parameters of the Data Center Subsystem

Группа параметров	Примеры показателей	Значение для модели
Архитектура и размещение	тип (наземный, подземный, модульный), площадь, этажность, удаленность от источников энергии	влияет на охлаждение, безопасность, стоимость строительства
Энергетические параметры	потребляемая мощность, PUE, ERF, структура источников (ТЭЦ, ВИЭ, когенерация, метан)	определяют нагрузку на энергосистему и устойчивость работы
Системы охлаждения	тип охлаждения (жидкостное, воздушное, рекуперативное), утилизация тепла	задают эффективность теплового цикла
Надежность и резервирование	уровень отказоустойчивости (Tier I–IV), схема резервного питания, резервные каналы связи	определяют критичность и класс ЦОД
Коммуникации	тип подключения (оптоволокно, DWDM, спутниковый канал), задержки и пропускная способность	важны для интеграции с другими узлами и КИИ
Интеграция с энергосистемой	возможность работы в режиме Demand Response, наличие систем накопления энергии, гибридная генерация	повышает гибкость и устойчивость
Экологические показатели	доля ВИЭ, уровень рекуперации тепла, выбросы CO <sub>2</sub> -эквивалента	определяют экологическую эффективность
Экономические параметры	CAPEX, OPEX, стоимость 1 МВт мощности, коэффициент загрузки	влияют на экономическую оценку внедрения
Перспективные направления	внедрение ИИ-систем управления, цифровые двойники, автоматизация техобслуживания	определяют развитие ЦОД в долгосрочной перспективе

Таким образом, подсистема ЦОД служит связующим звеном между энергетической, инфраструктурной и геологической подсистемами, формируя замкнутый контур энергоинформационного обмена. Ее параметры определяют не только эффективность работы всей модели, но и потенциал формирования в угольных регионах России устойчивых дата-инфраструктурных кластеров, способных выполнять функции национальных вычислительных резервов и узлов КИИ.



### Интеграционная схема

Представленная интеграционная схема отражает взаимосвязь геологической, энергетической, инфраструктурной и цифровой подсистем в рамках единого территориально-промышленного контура. Каждая из них формирует собственные входные и выходные параметры, обеспечивая замкнутый цикл управления потоками данных, энергии и ресурсов. Геологическая подсистема предоставляет первичную информацию о структуре недр, параметрах метаноносности, прогнозных ресурсах и состояниях горнотехнической среды, формируя основу для принятия решений на всех последующих уровнях. Энергетическая подсистема использует эти данные для планирования генерации и распределения энергии, включая утилизацию метана, интеграцию ВИЭ и оптимизацию загрузки существующих мощностей. Инфраструктурная подсистема обеспечивает пространственно-логистическую связность – объединяет производственные площадки, транспортные узлы и инженерные сети, определяя технические и организационные условия для размещения энергетических и цифровых объектов.

Центральное место в интеграционной схеме занимает подсистема центров обработки данных, которая выполняет роль управляющего и аналитического ядра. ЦОД аккумулируют потоки телеметрических данных, формируют цифровые двойники подсистем, осуществляют прогнозирование, диспетчеризацию и адаптивное управление режимами работы. На основе алгоритмов машинного обучения и сценарного моделирования формируются рекомендации по распределению энергетических и материальных ресурсов, выбору оптимальных производственных сценариев и обеспечению устойчивости в условиях изменяющихся внешних факторов.

Взаимодействие между подсистемами обеспечивается через многоуровневую систему обмена данными, включающую три контура:

1. оперативный (низкоуровневые датчики, системы мониторинга и телеметрии);
2. управляющий (локальные контроллеры, цифровые двойники оборудования, SCADA);
3. аналитический (ЦОД, региональные платформы, облачные сервисы).

Такой подход позволяет формировать адаптивную и саморегулирующуюся структуру, в которой решения принимаются на основе непрерывного анализа больших данных. При этом энергетическая и инфраструктурная подсистемы становятся физическим фундаментом для функционирования цифрового уровня, а ЦОД – интеллектуальным центром интеграции, замыкающим обратные связи с геологической подсистемой через прогнозирование и моделирование процессов дегазации, выработки и распределения энергии.

Схема (Рис. 6) демонстрирует замкнутый контур взаимодействий, где ключевыми потоками являются:

- геоинформационные данные о состоянии недр и параметрах добычи;
- энергетические потоки от источников (угольный метан, ТЭЦ, ВИЭ, когенерационные установки) к инфраструктурным и цифровым объектам;
- обратные потоки данных и управляющих сигналов от ЦОД к подсистемам.

Таким образом, интеграционная схема отражает переход от линейной производственно-энергетической цепочки к киберфизической системе, в которой информационные и материальные процессы объединяются в единый контур адаптивного управления. Это создает предпосылки для построения интеллектуальной модели устойчивого развития угольных регионов, где добыча, переработка, генерация энергии и цифровая обработка данных рассматриваются как элементы единой техносферы.

### Описание предполагаемой модели энергоснабжения ЦОД

Представленная на Рис. 7 модель отражает интегрированную архитектуру энергоснабжения ЦОД, размещенного на промышленной площадке угольной шахты и ориентированного на выполнение ресурсоемких процессов обучения и эксплуатации систем ИИ. В основу модели положено сочетание нескольких источников энергии: внешней энергосистемы, ВИЭ, СНЭЭ и локальной тригенерационной установки на угольном метане, обеспечивающей электро-, тепло- и холодоснабжение.

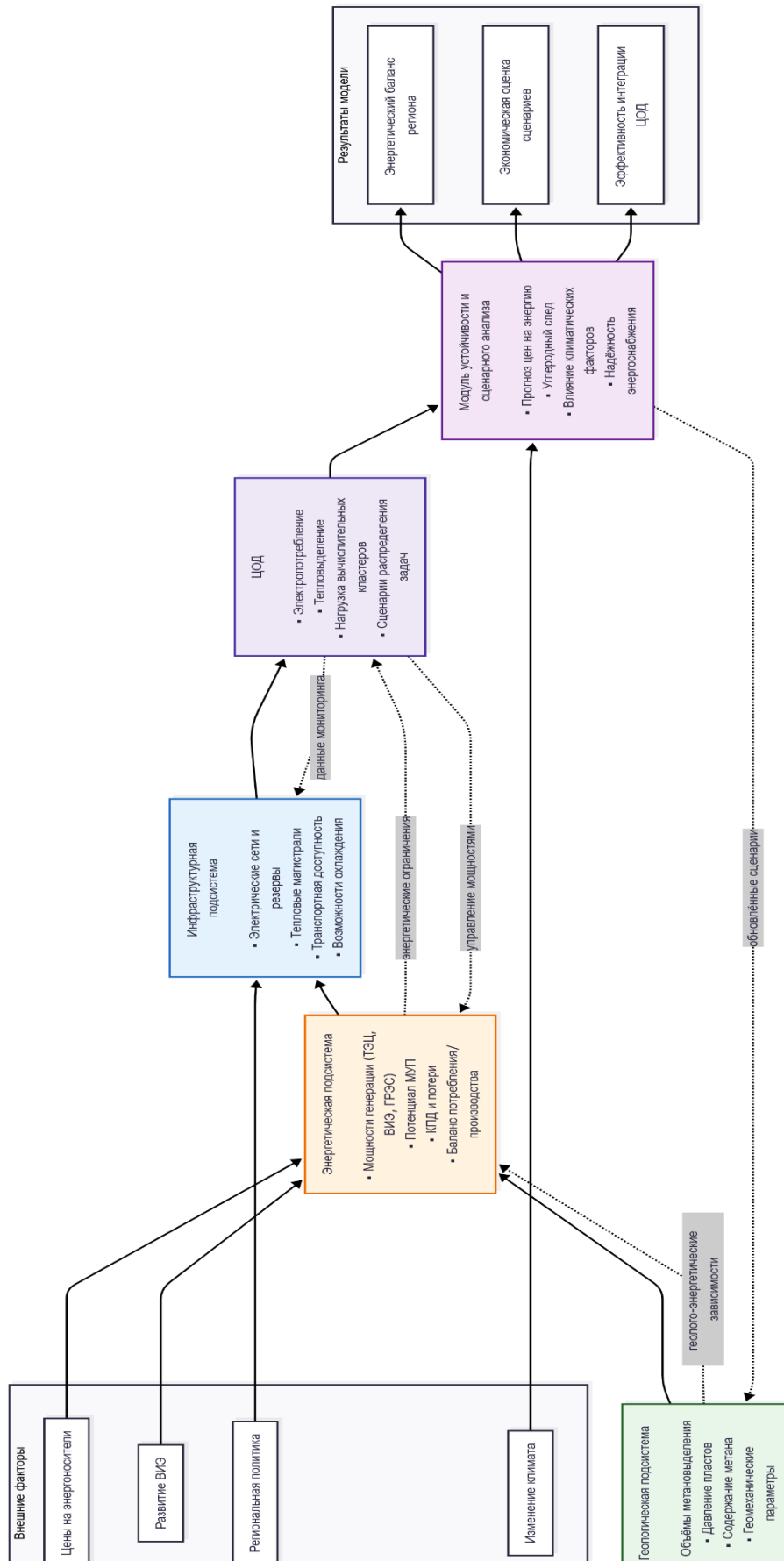


Рис. 6. Схема взаимодействия геоинформационных и энергетических систем  
Fig. 6. Diagram of interaction between geoinformation and energy systems

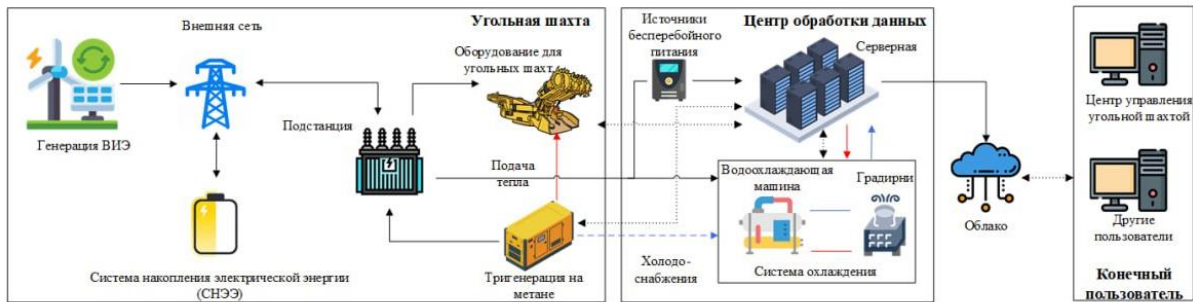


Рис. 7. Архитектура энергоснабжения и охлаждения ЦОД, размещенного на промышленной площадке угольной шахты

Fig. 7. Power supply and cooling architecture for a data center located on the industrial site of a coal mine

Источник бесперебойного питания (ИБП) формирует основной контур надежного электроснабжения ЦОД. Важным элементом ИБП является синхронный генератор, параметры которого управляются системой возбуждения и контролируются в реальном времени для поддержания стабильности напряжения и частоты при изменяющейся ИТ-нагрузке. Внешняя сеть и СНЭЭ используются как резервные каналы, обеспечивающие высокую устойчивость при аварийных или послеаварийных режимах. Механическим источником энергии, который приводит в движение генератор, является газопоршневая (ГПУ) либо газотурбинная установка (ГТУ), работающая на метане, получаемом в процессе дегазации шахт. Различия динамических характеристик ГПУ и ГТУ имеют большое значение для модели: ГПУ более чувствительна к резким скачкам нагрузки и демонстрирует значимое проседание частоты, тогда как ГТУ обеспечивает более гладкое реагирование на переменные ИТ-нагрузки, что повышает качество электроэнергии, подаваемой на оборудование ЦОД. ИТ-нагрузка ЦОД включает совокупное потребление серверного оборудования и инженерных систем охлаждения, доля которых может достигать 50% [40] от общей мощности. Характер нагрузки является резко переменным: после завершения ресурсоемких процессов, таких как обучение нейросетей, энергопотребление определяется интенсивностью обращений пользователей и вычислительных задач, что приводит к кратковременным пикам мощности.

### Заключение

Разработанная концепция энергетико-инфраструктурной интеграции свидетельствует о реальном потенциале переориентации угольных регионов в сторону формирования энергоцифровых кластеров. Интеграция геолого-технологической, энергетической и инфраструктурной подсистем с подсистемой ЦОД обеспечивает основы для повышения энергетической эффективности, сокращения углеродного следа и усиления национальной устойчивости критической информационной инфраструктуры. При этом достижение проектных результатов требует последовательной реализации прикладных исследований и инженерных разработок, ориентированных на практическую отработку предложенной модели в конкретных региональных условиях.

Во исполнение позиции о необходимости продолжения работ формулируются следующие ключевые научно-технические задачи и этапы исследований:

1. Сформировать региональную геопространственную базу данных (ГИС) для выбранного пилотного региона, включающую карты пластов, скважин, выработок, энергетических и транспортных сетей; обеспечить стандартизацию форматов данных и процедур верификации входных показателей.
2. Разработать и верифицировать прототип цифрового двойника площадки (digital twin), объединяющий геолого-технические, энергетические и инфраструктурные модели с возможностью имитации режимов дегазации, выработки энергии и работы ЦОД в реальном времени.



3. Сконструировать модуль сценарного экономико-энергетического анализа, способный проводить многовариантное моделирование с учетом ценовых, нормативных и климатических сценариев; включить в модуль расчетные алгоритмы для технико-экономической оценки CAPEX/OPEX, расчета срока окупаемости и чувствительности ключевых показателей.
4. Исследовать и апробировать технические решения по утилизации метана в составе гибридных энергетических установок (газопоршневые установки, когенерация/тригенерация, интеграция с ВИЭ и накопителями) с учетом качества газа и требований к подготовке топлива.
5. Разработать методики инженерной оценки пригодности площадок и подземных выработок для размещения ЦОД, включающие геомеханический мониторинг, критерии допустимых деформаций, требования к вентиляции и пыле-влажностным режимам.
6. Проработать архитектуры систем охлаждения для специфики горнотехнической среды: оценить применимость геотермальных контуров, шахтного аккумулирования тепла, жидкостного и гибридного охлаждения с учетом энергоэффективности и эксплуатационной надежности.
7. Оценить регуляторные и нормативные ограничения, разработать предложения по адаптации действующих стандартов и нормативов (включая требования к КИИ и реестру ЦОД) для безопасной интеграции ЦОД в угольные регионы.
8. Исследовать социально-экономические эффекты трансформации: модели занятости, влияние на локальные рынки труда, механизмы вовлечения промышленного персонала в новые технологические цепочки, а также оценку социальных рисков и мер социальной поддержки.
9. Организовать пилотный проект по созданию демонстрационного энергетико-цифрового кластера с участием промышленного партнера, энергетического оператора и региональных органов власти для апробации методик, технологий и процедур интеграции.
10. Сформировать междисциплинарную программу подготовки специалистов (инженеров-энергетиков, горных инженеров, специалистов по ЦОД и цифровым двойникам), включающую учебные модули и стажировки на пилотных объектах.

Реализация перечисленных задач предполагает поэтапную стратегию: пилотирование технологических решений на ограниченной площадке, масштабирование успешно отработанных схем и последующую интеграцию результатов в региональные программы развития. Приоритетом остается инженерная обоснованность решений, а экономические и социальные критерии служат инструментом проверки их жизнеспособности. Совокупность предложенных исследований создаст практико-ориентированную научную базу для принятия решений о масштабном внедрении энергетико-инфраструктурной интеграции ЦОД в угольных регионах и обеспечит методологическую основу для дальнейших публикаций и грантовых проектов.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

### **Информация об авторах**

*Варнавский Кирилл Александрович*, кандидат техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса,



e-mail: varnavskijka@kuzstu.ru

**Ермаков Александр Николаевич**, кандидат техн. наук, доцент, директор горного института,  
e-mail: ermakovan@kuzstu.ru

**Хорешок Алексей Алексеевич**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов,  
e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

**Лебедев Геннадий Михайлович**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий,  
e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

**Смирнова Арина Дмитриевна**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса; исследователь по программе академического обмена в институте энергетики и горного дела,  
e-mail: smirnovaad@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Шаньдунский университет науки и технологий  
266590, КНР, г. Циндао, ул. Цяньванан, 579

**Тришкин Федор Александрович**, инженер,  
e-mail: fedor.trishkin@powerps.ru

ООО «Пауэр Протекшн Сервис»,  
141432, Российская Федерация, г. Химки, квартал Клязьма, д. 1г, стр. 4

**Заславский Илья Сергеевич**, аспирант, научный сотрудник научно-исследовательской лабораторий цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса,  
e-mail: zaslavskiyis@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева  
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

### Список литературы

1. Russian coal on the global market: difficulties and weak prospects [Электронный ресурс] // OSW Centre for Eastern Studies. – 2025. – Режим доступа: <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/osw-commentary/2025-04-23/russian-coal-global-market-difficulties-and-weak-prospects> (дата обращения: 08.11.2025).
2. Киловатт палата [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. – 2025. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/8043060> (дата обращения: 30.10.2025).
3. Energy and AI – Analysis. IEA [Сайт]. Режим доступа: <https://www.iea.org/> (дата обращения: 30.10.2025).
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.04.2025 № 908-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года».
5. Протокол президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 04.07.2025 № 29пр «Методические рекомендации по цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием».



6. Указ Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».
7. Федеральный закон от 23.07.2025 № 244-ФЗ «О внесении изменений в статьи 2 и 6 Федерального закона «О связи» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
8. Wu, C. Cloud data centers and cost modeling: a complete guide to planning, designing and building a cloud data center / C. Wu, R. Buyya. – 1st ed. – San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2015. – 848 p.
9. Sharma, P. Design and operational analysis of a green data center / P. Sharma et al. // IEEE Internet Computing. – 2017. – Vol. 21. – № 4. – P. 16-24.
10. Hwaiyu, G. Data center handbook: plan, design, build, and operations of a smart data center / G. Hwaiyu. – 2nd ed. – Palo Alto, CA: John Wiley & Sons Inc., 2021. – 675 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119597537.fmatter>.
11. Tailakov, O. Utilization prospects for coal mine methane (CMM) in Kuzbass / O. Tailakov et al. // E3S Web Conf. – 2017. – Vol. 15. – № 02002. – P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171502002>.
12. Varnavskiy, K. Underground hard-coal mine as a hosting facility for a data processing center infrastructure / K. Varnavskiy et al. // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. – 2021. – Vol. 684. – № 1. – P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012015.
13. Velkova, J. Retrofitting and ruining: Bunkered data centers in and out of time / J. Velkova // New Media & Society. – 2023. – Vol. 25. – № 2. – P. 431-448. DOI: <https://doi.org/10.1177/14614448221149946>.
14. Ikeda, H. Digital twin technology in data center simulations: evaluating the feasibility of a former mine site / H. Ikeda et al. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – № 23. – P. 16176.
15. Ding, Y. Repurposing coal power plants into thermal energy storage for supporting zero-carbon data centers [Электронный ресурс] / Y. Ding et al. – 2024. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2402.09675>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.09675>. (дата обращения: 20.09.2024).
16. Hildebrandt, R. Transforming underground coal mine workings into critical cyber security facilities in the perspective of the European Green Deal plan / R. Hildebrandt et al. // Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series. – 2023. – Vol. 182. – P. 79-97. DOI: 10.29119/1641-3466.2023.182.5.
17. Васильев, А.Н. Методические подходы к построению геолого-гидродинамических моделей для оценки снижения газоносности угольных пластов при проектировании заблаговременной дегазации шахтных полей / А.Н. Васильев, В.В. Шишляев, Р.В. Кузнецов // Проблемы недропользования. – 2022. – Т. 33. – № 2. – С. 5-22.
18. Coal mine methane country profiles [Электронный ресурс] // U.S. Environmental protection agency coalbed methane outreach program. – 2015. – 381 p. – Режим доступа: <https://www.globalmethane.org/> (дата обращения: 08.11.2025).
19. Милькина, А. Высокие технологии на угле: как обеспечить энергией ЦОДы [Электронный ресурс] / А. Милькина // Ведомости. – 2025. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/analytics/ideas/articles/2025/10/29/1150983-visokie-tehnologii-na-ugle-kak-obespechit-energiei-tsodi> (дата обращения: 02.11.2025).
20. Adaptive reuse of coal infrastructure to support data centers [Электронный ресурс] // Federation of American scientists. – Режим доступа: <https://fas.org/publication/adaptive-reuse-legacy-coal-infrastructure/> (дата обращения: 09.11.2025).
21. Yin, P. Performance analysis of lake water cooling coupled with a waste heat recovery system in the data center / P. Yin et al. // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – № 15. – P. 6542.
22. Hu, Y. A submerged building strategy for low-carbon data centers in coal mining subsidence areas: system design and energy-carbon performance assessment / Y. Hu et al. // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 17. – P. 3148.
23. Карнаухов, А.М. Направления развития «цифрового рывка» в геологоразведке / А.М. Карнаухов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2019. – Т. 14. – № 4. – С. 1-12.
24. Гайворонский, А.И. Технично-технологические решения проектов сжижения метана угольных пластов / А.И. Гайворонский, М.В. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – Т. 754. – № 1. – С. 63-75. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-63-75.
25. Приказ Ростехнадзора от 23.06.2022 №195 «О внесении изменений в Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», утвержденные приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 №507.
26. Тайлаков, О.В. Выбор перспективных угольных шахт для реализации проекта получения водорода из дегазационного метана / О.В. Тайлаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 88-100. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_88.



27. Statistical review of world energy – 2024 edition. UK, London: Energy Institute, 2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения: 20.09.2024).
28. Adedoyin, F.F. Modelling coal rent, economic growth and CO2 emissions: does regulatory quality matter in BRICS economies? / F.F. Adedoyin et al. // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 710. – P. 136284.
29. Wang, Y. Data center integrated energy system for sustainability: generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives / Y. Wang et al. // *Innovation in Energy*. – 2024. – Vol. 1. – № 1. – P. 100014-100017.
30. Booth, S. Microgrids for energy resilience: a guide to conceptual design and lessons from defense projects / S. Booth et al. – Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-72586, 2019. – 82 p.
31. Smirnova, A. The development of coal mine methane utilization infrastructure within the framework of the concept “Coal-Energy-Information” / A. Smirnova et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – № 23. – P. 8948.
32. Cao, Z. Towards a systematic survey for carbon neutral data centers [Электронный ресурс] / Z. Cao et al. – 2022. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2110.09284>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09284>. (дата обращения: 20.09.2024).
33. Stephen, B. Enhancing the resilience and efficiency of microgrids through optimal integration of renewable energy sources and intelligent control systems: a review / B. Stephen et al. // *KIU Journal of Science, Engineering and Technology*. – 2024. – Vol. 3. – P. 21-38.
34. Bennaceur, W.M. Formal models for safety and performance analysis of a data center system / W.M. Bennaceur, L. Kloul // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2020. – Vol. 193. – P. 106643.
35. Keskin, I. Reliability, availability, and life-cycle cost (LCC) analysis of combined cooling, heating and power (CCHP) integration to data centers considering electricity and cooling supplies / I. Keskin, G. Soykan // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Vol. 291. – P. 117254.
36. Brodie, P. Data infrastructure studies on an unequal planet / P. Brodie // *Big Data & Society*. – 2023. – Vol. 10. – №1. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1177/20539517231182402>.
37. Chandrakant, P. Cost model for planning, development and operation of a data center / P. Chandrakant, S. Amip. – Berkeley, CA: Hewlett-Packard Development Company, 2005. – 36 p.
38. Sartor, D. Repurposing coal assets for a decarbonized digital economy / D. Sartor et al. – Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023. – 103 p.
39. Zhang, Q. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization / Q. Zhang et al. // *Journal of systems architecture*. – 2021. – Vol. 119. – P. 102253.
40. Zhang, Y. Cooling technologies for data centres and telecommunication base stations – A comprehensive review / Y. Zhang et al. // *Journal of cleaner production*. – 2022. – Vol. 334. – P. 130280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130280>.



UDC 622.013

## ENERGY-INFRASTRUCTURE MODELS FOR THE INTEGRATION OF DATA PROCESSING CENTERS INTO THE INDUSTRIAL COMPLEX OF COAL REGIONS

Kirill A. Varnavsky<sup>1</sup>, Alexander N. Ermakov<sup>1</sup>, Arina D. Smirnova<sup>1,2</sup>, Fedor A. Trishkin<sup>3</sup>,  
Ilya S. Zaslavsky<sup>1,4</sup>, Alexey A. Khoreshok<sup>1</sup>, Gennady M. Lebedev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

<sup>2</sup> Shandong University of Science and Technology

<sup>3</sup> Power Protection Service, LLC

<sup>4</sup> Ural State University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin



### Article info

Received:  
08 October 2025

Revised:  
12 January 2026

Accepted:  
24 February 2026

**Keywords:** coal region, data center, energy integration, industrial infrastructure, critical information infrastructure, modeling, industry transformation

### Abstract.

The relevance of this research is determined by the structural crisis in the coal industry, the decline in global and domestic demand for thermal coal, and the need to diversify the economy of coal-mining regions. Under these conditions, it becomes essential to reconsider the role of industrial and energy infrastructure originally developed to support mining operations. One of the promising directions is the deployment of data centers (DCs), which are elements of critical information infrastructure, on sites released as coal production decreases. The purpose of the study is to develop a concept of an energy-infrastructure model for integrating data centers into the industrial system of coal regions. The proposed approach is based on engineering and analytical modeling, including the assessment of coal seam degasification potential, analysis of energy flows, modeling of power supply modes, and investigation of the long-term sustainability of regional infrastructure. The study also considers the possibilities of utilizing methane extracted during degasification for power generation and the prospects of combining traditional and renewable energy sources to form autonomous and distributed power systems. As a result, the principles of constructing a functional model have been formulated, reflecting the interrelation between geological-technological, energy, and infrastructural factors in the placement of data centers. The obtained results can be applied in the design and modernization of industrial sites, in the development of regional technological transformation programs, and in the long-term planning of energy systems in coal regions, providing a scientific and technical foundation for the transition toward sustainable and high-tech industrial development.

---

**For citation:** Varnavsky K.A., Ermakov A.N., Smirnova A.D., Trishkin F.A., Zaslavsky I.S., Khoreshok A.A., Lebedev G.M. Energy-infrastructure models for the integration of data processing centers into the industrial complex of coal regions. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2026;1(32):4-26. DOI: 10.26730/2618-7434-2026-1-4-26, EDN: QDJKPT

---

### References

1. Russian coal on the global market: difficulties and weak prospects // OSW Centre for Eastern Studies. – 2025. – Available at: <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/osw-commentary/2025-04-23/russian-coal-global-market-difficulties-and-weak-prospects> (accessed: 08.11.2025).
2. Kilovatt palata // Kommersant. – 2025. – Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/8043060> (accessed: 30.10.2025). [In Russ.].
3. Energy and AI – Analysis. IEA. Available at: <https://www.iea.org/> (accessed: 30.10.2025).
4. Rasporozhdenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 12.04.2025 № 908-r «Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossijskoj Federacii na period do 2050 goda». (Decree of the Government of the Russian



Federation No. 908-r dated April 12, 2025, “On the Approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the Period until 2050.”) [In Russ.].

5. Protokol prezidiuma Pravitel'stvennoj komissii po cifrovomu razvitiyu, ispol'zovaniyu informacionnyh tekhnologij dlya uluchsheniya kachestva zhizni i uslovij vedeniya predprinimatel'skoj deyatel'nosti ot 04.07.2025 № 29pr «Metodicheskie rekomendacii po cifrovoj transformacii gosudarstvennyh korporacij i kompanij s gosudarstvennym uchastiem». (Minutes of the Presidium of the Government Commission on Digital Development, Use of Information Technologies to Improve the Quality of Life and Conditions for Entrepreneurship dated July 4, 2025, No. 29pr “Methodological recommendations on the digital transformation of state corporations and companies with state participation.”) [In Russ.].

6. Ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2024 № 309 «O nacional'nyh celyah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2036 goda». (Decree of the President of the Russian Federation No. 309 of May 7, 2024, “On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 and the outlook for 2036.”) [In Russ.].

7. Federal'nyj zakon ot 23.07.2025 № 244-FZ «O vnesenii izmenenij v stat'i 2 i 6 Federal'nogo zakona «O svyazi» i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii». (Federal Law No. 244-FZ of July 23, 2025, «On Amendments to Articles 2 and 6 of the Federal Law «On Communications» and Certain Legislative Acts of the Russian Federation») [In Russ.].

8. Wu, C. Cloud data centers and cost modeling: a complete guide to planning, designing and building a cloud data center / C. Wu, R. Buyya. – 1st ed. – San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2015. – 848 p.

9. Sharma, P. et al. Design and operational analysis of a green data center. *IEEE Internet Computing*. 2017;24(4):16-24.

10. Hwaiyu, G. Data center handbook: plan, design, build, and operations of a smart data center. – 2nd ed. – Palo Alto, CA: John Wiley & Sons Inc., 2021. – 675 p. DOI: 10.1002/9781119597537.fmatter.

11. Tailakov, O. et al. Utilization prospects for coal mine methane (CMM) in Kuzbass. *E3S Web of Conferences*. 2017;15:02002. DOI: 10.1051/e3sconf/20171502002.

12. Varnavskiy, K. et al. Underground hard-coal mine as a hosting facility for a data processing center infrastructure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 2021;684(1):012015. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012015.

13. Velkova, J. Retrofitting and ruining: Bunkered data centers in and out of time. *New Media & Society*. 2023;25(2):431-448. DOI: 10.1177/14614448221149946.

14. Ikeda, H. et al. Digital twin technology in data center simulations: evaluating the feasibility of a former mine site. *Sustainability*. 2023;15(25):16176.

15. Ding, Y. Repurposing coal power plants into thermal energy storage for supporting zero-carbon data centers / Y. Ding et al. – 2024. Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.09675>. DOI: 10.48550/arXiv.2402.09675. (accessed: 20.09.2025).

16. Hildebrandt, R. et al. Transforming underground coal mine workings into critical cyber security facilities in the perspective of the European Green Deal plan. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2023;182:79-97. DOI: 10.29119/1641-3466.2023.182.5.

17. Vasiliev, A.N. Methodological approaches to the construction of geological and hydrodynamic models for evaluation of the reduction of the gas potential of coal seam in the design of early degassing of mine fields / A.H. Vasiliev, V.V. Shishlyaev, R.V. Kuznetsov. *Problems of subsoil use*. 2022;33(2):5-22. [In Russ.].

18. Coal mine methane country profiles // U.S. Environmental protection agency coalbed methane outreach program. – 2015. – 381 p. – Available at: <https://www.globalmethane.org/> (accessed: 08.11.2025).

19. Mil'kina, A. Vysokie tekhnologii na ugle: kak obespechit' energiej CODy / A. Mil'kina // *Vedomosti*. – 2025. – Available at: <https://www.vedomosti.ru/analytics/ideas/articles/2025/10/29/1150983-visokie-tehnologii-na-ugle-kak-obespechit-energiei-tsodi> (accessed: 02.11.2025). [In Russ.].

20. Adaptive reuse of coal infrastructure to support data centers // Federation of American scientists. – Available at: <https://fas.org/publication/adaptive-reuse-legacy-coal-infrastructure/> (accessed: 09.11.2025).

21. Yin, P. et al. Performance analysis of lake water cooling coupled with a waste heat recovery system in the data center. *Sustainability*. 2024;16(15):6542.

22. Hu, Y. et al. A submerged building strategy for low-carbon data centers in coal mining subsidence areas: system design and energy-carbon performance assessment. *Buildings*. 2025;15(17):3148.

23. Karnaukhov, A.M. Directions of “Digital wrench” development in geological petroleum exploration. *Oil and Gas Geology. Theory & Practice*. 2019;14(4):1-12. [In Russ.].

24. Technical and technological solutions for the coal bed methane liquefaction projects / A.I. Gaivoronsky, M.V. Gorbunov. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;754(1):63-75. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-63-75. [In Russ.].



25. Prikaz Rostekhnadzora ot 23.06.2022 No. 195 “O vnesenii izmenenii v Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti “Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh”, utverzhdennye prikazom Rostekhnadzora ot 08.12.2020 No. 507. (Order of Rostekhnadzor dated June 23, 2022 No. 195 “On amendments to federal standards and rules in the field of industrial safety “Safety rules in coal mines”, approved by Rostekhnadzor Order No. 507 dated December 8, 2020.) [In Russ.].
26. Tailakov, O.V. Selection of promising coal mines for implementing project of hydrogen production from coal mine methane. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2024;11:88-100. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_88. [In Russ.].
27. Statistical review of world energy – 2024 edition. UK, London: Energy Institute, 2023. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (accessed: 20.09.2024).
28. Adedoyin, F.F. Modelling coal rent, economic growth and CO2 emissions: does regulatory quality matter in BRICS economies? *Science of the Total Environment*. 2019;710:136284.
29. Wang, Y. et al. Data center integrated energy system for sustainability: generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives. *Innovation in Energy*. 2024;1(1):100014-100017.
30. Booth, S. Microgrids for energy resilience: a guide to conceptual design and lessons from defense projects / S. Booth et al. – Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-72586, 2019. – 82 p.
31. Smirnova, A. et al. The development of coal mine methane utilization infrastructure within the framework of the concept «Coal – Energy – Information». *Energies*. 2022;15(23):8948.
32. Cao, Z. Towards a systematic survey for carbon neutral data centers / Z. Cao et al. – 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.09284>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09284>. (accessed: 20.09.2024).
33. Stephen, B. et al. Enhancing the resilience and efficiency of microgrids through optimal integration of renewable energy sources and intelligent control systems: a review. *KIU Journal of Science, Engineering and Technology*. 2024;3:21-38.
34. Bennaceur W.M., Kloul L. Formal models for safety and performance analysis of a data center system. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020;193:106643.
35. Keskin I., Soykan G. Reliability, availability, and life-cycle cost (LCC) analysis of combined cooling, heating and power (CCHP) integration to data centers considering electricity and cooling supplies. *Energy Conversion and Management*. 2023;291:117254.
36. Brodie, P. Data infrastructure studies on an unequal planet. *Big Data & Society*. 2023;10(1):14. DOI: 10.1177/20539517231182402.
37. Chandrakant, P. Cost model for planning, development and operation of a data center / P. Chandrakant, S. Amip. – Berkeley, CA: Hewlett-Packard Development Company, 2005. – 36 p.
38. Sartor, D. Repurposing coal assets for a decarbonized digital economy / D. Sartor et al. – Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023. – 103 p.
39. Zhang, Q. et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization. *Journal of systems architecture*. 2021;119:102253.
40. Zhang, Y. et al. Cooling technologies for data centres and telecommunication base stations – A comprehensive review. *Journal of cleaner production*. 2022;334:130280. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130280.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Kirill A. Varnavsky**, PhD, Head of the Mining Industry Digital Transformation Lab  
e-mail: [varnavskijka@kuzstu.ru](mailto:varnavskijka@kuzstu.ru)

**Alexander N. Ermakov**, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Mining Institute  
e-mail: [ermakovan@kuzstu.ru](mailto:ermakovan@kuzstu.ru)

**Alexey A. Khoreshok**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes  
e-mail: [haa.omit@kuzstu.ru](mailto:haa.omit@kuzstu.ru)



**Gennady M. Lebedev**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Electrical Supply of Mining and Industrial Enterprises  
e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
650000, Russian Federation, Kemerovo, 28 Vesennaya St.

**Arina D. Smirnova**, Researcher of Mining Industry Digital Transformation Lab; Academic Exchange Researcher at College of Energy and Mining Engineering  
e-mail: smirnovaad@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
650000, Russian Federation, Kemerovo, 28 Vesennaya St.

Shandong University of Science and Technology  
266590, P.R. China, Qingdao, 579 Qianwangang St.

**Fedor A. Trishkin**, engineer  
e-mail: fedor.trishkin@powerps.ru

Power Protection Service LLC  
141432, Russia, Khimki, Klyazma Sq., 1g, 4

**Ilya S. Zaslavsky**, PhD student, Researcher of Mining Industry Digital Transformation Lab,  
e-mail: zaslavskiyis@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University  
650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28

Ural State University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
620062, Russia, Ekaterinburg, Mira St., 19

