

Поиск возможностей применения методов искусственного интеллекта в задачах энергетического планирования

Хоршев Андрей Александрович

Институт энергетических исследований
Российской академии наук

Заседание Подкомитета С5 РНК СИГРЭ по тематическому направлению «Рынки электроэнергии и регулирование»

Москва, 8 апреля 2026 г.



Данное выступление частично подготовлено по итогам Консультативного совещания по применению ИИ в задачах энергетического планирования (Consultancy Meeting on AI in Energy Planning Applications), состоявшегося с 18 по 22 августа 2025 г. в штаб-квартире МАГАТЭ, г. Вена, Австрия

В этом совещании приняли участие представители МАГАТЭ, IRENA, Climate Compatible Growth (Великобритания), Argonne National Laboratory (США), Университета Кейптауна (ЮАР), ИНЭИ РАН

Определение ИИ

AI>ML>Deep Learning>Generative AI

ИИ > Машинное обучение > Глубокое обучение > Генеративный ИИ

Искусственный интеллект

общая концепция, согласно которой машины могут выполнять задачи способом, который человек считает «умным»

Машинное обучение

подраздел ИИ, в котором машины обучаются и выявляют закономерности на основе данных

Глубокое обучение

подраздел МО, в котором обучение происходит с помощью нейронных сетей, имеющих много слоев

Генеративный ИИ

подраздел ГО, который специализируется на создании нового контента, похожего на то, на чем модель была обучена

Определения предложены DeepSeek

Примеры ИИ

Искусственный интеллект

Методы, основанные на правилах; поисковые алгоритмы; удовлетворение ограничений

Примеры: If-then правила, минимаксная оптимизация, поиск оптимального пути и т.д.

Машинное обучение

Линейная регрессия, логистическая регрессия, деревья решений, метод опорных векторов (SVM), K-средних (K-means), градиентный бустинг (GBM) и др.

Классификация, кластеризация, прогнозирование и т.д.

Глубокое обучение

Многослойные нейронные сети

Обработка естественного языка (NLP), распознавание изображений, прогнозирование временных рядов и т.д.

Генеративный ИИ

GAN, diffusion, LLM и т.д.

ИИ ≠ LLM (большие языковые модели)!

Примеры применения ИИ в энергетике – УЖЕ применяются

Энергоменеджмент

- Трейдинг электроэнергии
- Оптимизация работы электростанций
- «Умная» зарядка электромобилей

Предиктивное обслуживание и ремонт

- Предиктивное обслуживание и ремонт
- Обнаружение сбоев и аномалий
- Роботы-уборщики / роботы-ремонтники

Прогнозирование и работа с данными

- Прогнозирование выработки ВИЭ
- Прогнозирование спроса
- Обработка больших массивов данных (например, с умных счетчиков и т.п.)

Управление сетями и системами

- «Умные» сети (smart grid)
- Управление распределенными ресурсами (виртуальные электростанции, микро-сети и т.п.)



Tapestry: «Гугл-карты для электронов»

Проект Tapestry компании Google X нацелен на создание единой платформы на основе ИИ для всей электроэнергетической системы. По своей сути, это «Google Карты для энергосетей», обеспечивающая сквозные возможности для операционного управления и планирования.

Основные партнеры по внедрению

- PJM Interconnection (обслуживает ≈ 67 миллионов человек)
- Национальная энергосистема Чили (первое полномасштабное развертывание)
- Интеграция с технологиями Google Cloud и DeepMind

Основные функциональные возможности

- Крупномасштабное, долгосрочное моделирование работы сетей с почасовой детализацией.
- Автоматизированная обработка заявок на присоединение объектов к сетям.
- Унифицированная работа с данными из различных энергосистем.
- Облачная платформа, поддерживающая совместную работу.

Ключевые эффекты

- Ускоряет интеграцию возобновляемых источников энергии
- Устраняет «задержки» в очередях на присоединение к сетям.
- Позволяет сократить недели планирования до нескольких дней.

Open Power AI consortium (EPRI, NVIDIA, Cisco, MS, AWS, Oracle и др.)

EPRI, NVIDIA and Collaborators Launch Open Power AI Consortium to Transform the Future of Energy

Global consortium brings together utilities, technology companies, academia and more to build open AI models to transform the way we make, move and use electricity.

March 20, 2025 by [Marc Spieler](#)

Консорциум Open Power AI ставит своей целью преобразование электроэнергетической отрасли за счёт использования передовых технологий ИИ для инновационного изменения способов **производства, передачи и потребления** электроэнергии.

Стимулируя сотрудничество между лидерами отрасли, научными кругами и технологическими компаниями, консорциум будет способствовать разработке и внедрению новейших решений на основе ИИ, специально созданных для:

- Повышения операционной эффективности;
- Внедрения перспективных и устойчивых технологий;
- Роста надёжности и устойчивости энергосистем;
- Снижения затрат при одновременном улучшении качества обслуживания потребителей.



Articul

ORACLE

... and more

ChatGrid: Естественно-языковой интерфейс управления сетями

Как работает?

ChatGrid позволяет операторам взаимодействовать с энергосистемой, используя команды и запросы на обычном английском языке

«Какова генерация 5 наиболее крупных ВЭС в данный момент?»

Система использует большие языковые модели (LLM) для генерации SQL-запросов, при этом обеспечивая безопасность данных за счет обучения на схеме базы данных, а не на конфиденциальных данных энергосистемы

- Доступен на GitHub для всех
- Может интегрироваться с эксафлопсной вычислительной платформой ExaGO Министерства энергетики США
- Обеспечивает поддержку принятия решений в реальном времени для операторов энергосистемы

February 22, 2024 | News Release

ChatGrid™: A New Generative AI Tool for Power Grid Visualization

ChatGrid™ is a practical application of the Department of Energy's exascale computing efforts and offers a new experience in easy, intuitive, and interactive data interaction

JoAnna Wendel, PNNL

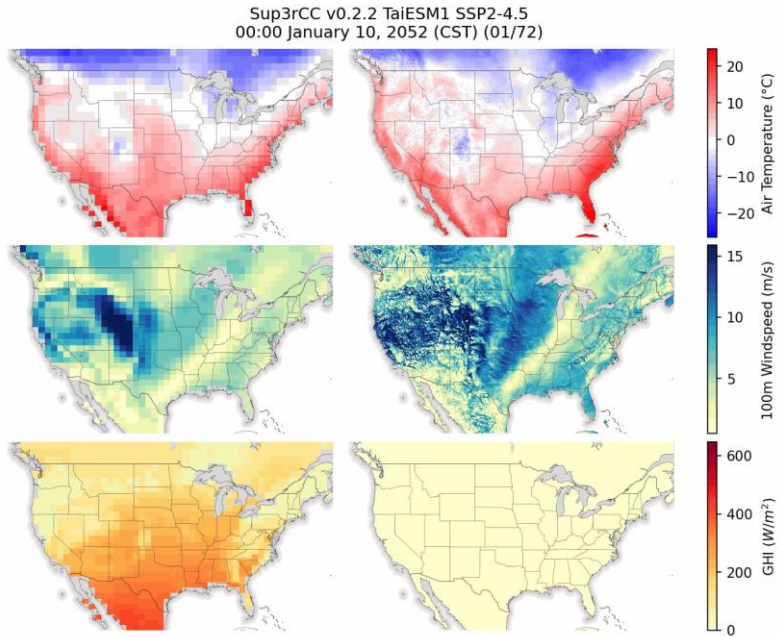
Sup3rCC: Климатические данные в супер-разрешении

NREL Unveils Groundbreaking Generative Machine Learning Model To Simulate Future Energy-Climate Impacts

New Open-Source, Publicly Available Model Rapidly Produces Super-Detailed Future Climate Data To Support Integrated Energy System Planning

April 10, 2024 | By Madeline Geocaris and Justin Daugherty | Contact [media](#) Share

15,000x Общий объем данных	25x Территориальное разрешение
24x Временное разрешение	40x Скорость расчета



Данные о будущих показателях ветра, солнечной радиации и температуры, полученные от традиционной глобальной климатической модели (слева), в сравнении с данными модели Sup3rCC (справа) Визуализация: Грант Бастер, NREL

RADR: Реагирование на чрезвычайные ситуации в энергетике с помощью ИИ (PNNL)

- Обработывает спутниковые изображения всего за 7–10 минут
- Отслеживает лесные пожары, наводнения, ураганы и землетрясения
- «Видит» сквозь дым с использованием инфракрасных и радиолокационных технологий
- Интегрирует данные из различных источников: спутников, дронов и самолётов

Wielding Artificial Intelligence, the National Labs Take a Stab at Disaster Resilience

By [Nicole Pouy](#) and [Raneem Iftikhar](#)

July 16, 2025

Влияние на энергетику

- Оценка ущерба энергетической инфраструктуре в реальном времени
- Защита критических элементов сети в случае природных чрезвычайных ситуаций
- Позволяет оперативно планировать и осуществлять реагирование

В основном все эти примеры связаны с оперативным управлением и краткосрочным прогнозированием. Применение ИИ в энергетическом планировании на долгосрочный период пока ограничено.

Некоторые реальные примеры применения методов ИИ в энергопланировании и моделировании

Кластеризация районов размещения ВЭС с использованием неконтролируемого машинного обучения методом k-средних (k-means)

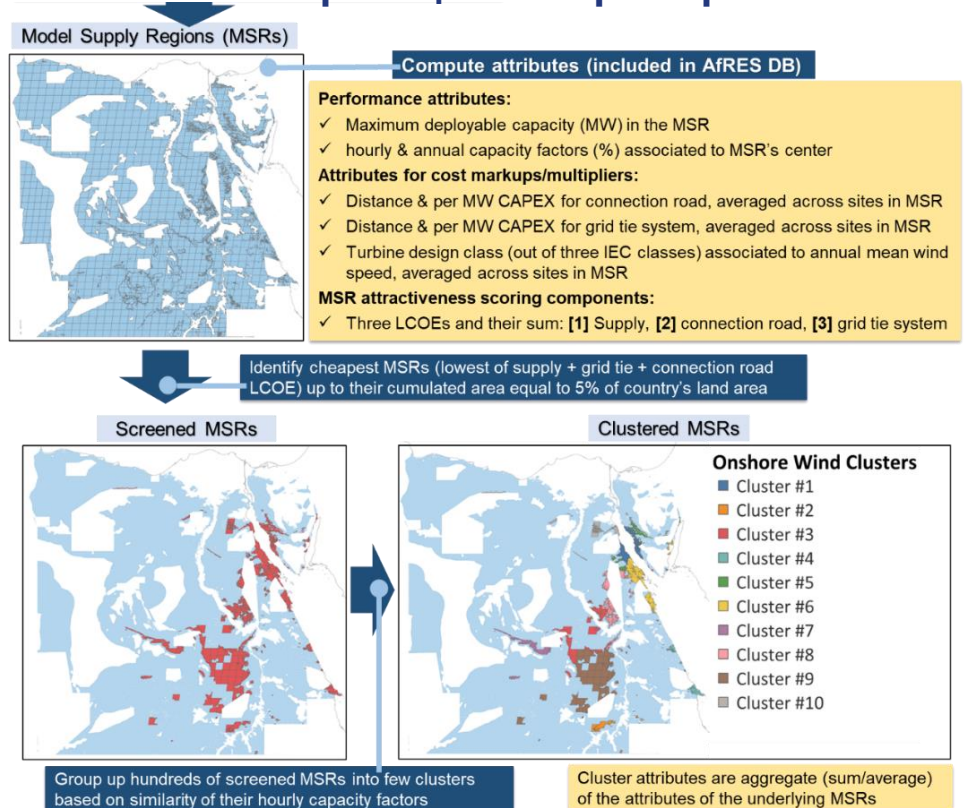
Кластеризация на примере Египта



International Renewable Energy Agency

Подход использован **Международным агентством по возобновляемой энергии (IRENA)** при разработке модели развития электроэнергетики Африки **SPLAT**, которая стала основой для разработки Генерального плана развития энергосистемы Африки (Africa Continental Power System Masterplan)

Выполнена группировка тысяч подходящих районов размещения ВЭС в небольшое количество кластеров на основе сходства их часовых профилей выработки:
7000+ районов => 239 кластеров



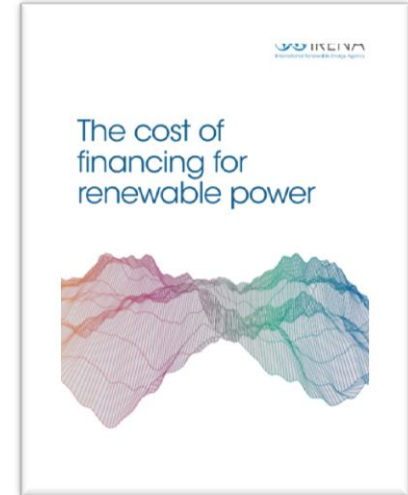
Использование генеративного ИИ при опросах экспертов

Рассматривается возможность использования LLM при прогнозировании **стоимости капитала** в рамках работы **Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA)** по оценке стоимости финансирования проектов ВИЭ (для разных стран и технологий). Эта работа традиционно выполняется методом опроса экспертов.

Генеративный ИИ может быть использован для:

- Предоставления предварительных оценок стоимости капитала по странам и технологиям.
- Оценки страновых и технологических премий за риск.
- Формирования аргументированных обоснований для начальных оценок.

Этот результат служит исходной точкой (!!!) для последующего анализа и уточнения экспертами-людьми в ходе опроса



Использование генеративного ИИ при опросах экспертов

Как это работает?

Используется **метод Дельфи** для достижения консенсуса экспертов, в качестве которых выступают ролевые модели (агенты) на основе больших языковых моделей (LLM) для имитации участников панели:

- 1. Независимые оценки:** Каждая ИИ-персона, настроенная на определенный экспертный профиль (например, ученый, финансист, инженер или представитель регулятора), предоставляет оценку стоимости капитала и сопровождающее её обоснование.
- 2. Анонимизированное обсуждение:** Каждая персона рецензирует мнение других, анализирует (подвергает сомнению) допущения и определяет зоны неопределенности.
- 3. Пересмотр и сходимоть:** Оценки пересматриваются с учетом результатов обсуждения, при этом для измерения уровня формирующегося консенсуса используются метрики сходимости

Пример результата для оценки соотношения собственного/заемного капитала для ЮАР

• South Africa: 70:30

- Investment risks for renewable projects in South Africa in 2023 include political and regulatory uncertainties due to potential policy changes and currency volatility impacting returns.
- Additionally, the creditworthiness of off-takers may pose a risk given the country's Ba2 sovereign rating and 3.3% default spread.
- The 70:30 debt-to-equity ratio is typical for renewable projects in South Africa, balancing the higher country risk premium and default spread with the need to optimize returns through leverage.

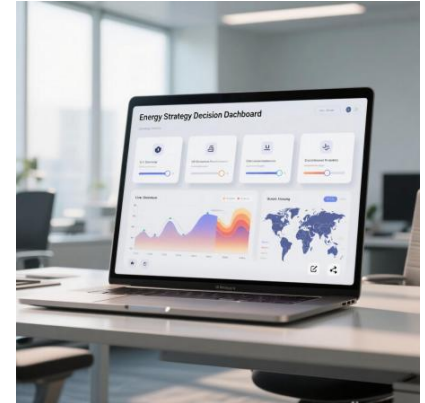
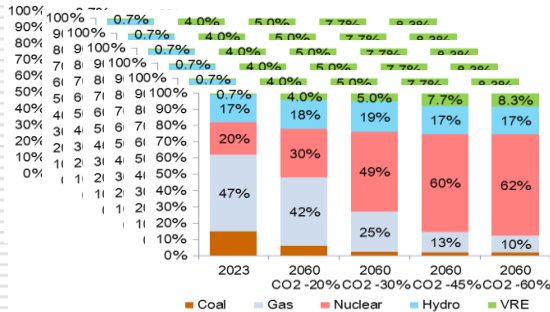
Место традиционных оптимизационных моделей в ИИ эру

В сегодняшнем быстро меняющемся мире от аналитики все чаще ждут оперативности и работы в реальном времени

Традиционные оптимизационные модели

Глубокое машинное обучение (deep learning)

«Планшет» ЛПР



Сотни и тысячи сценариев

«Мгновенная» генерация новых сценариев на основе варьирования заданных параметров (цены на топливо, выбросы CO₂, энергополитика, ресурсные ограничения) - **суррогатное моделирование**


Традиционные оптимизационные модели в ИИ эру



Energy
Volume 307, 30 October 2024, 132735



Machine learning as a surrogate model for EnergyPLAN: Speeding up energy system optimization at the country level

Matteo Giacomo Prina , Mattia Dallapiccola, David Moser, Wolfram Sparber

Проблема:

- Сложные модели энергосистем (например, **EnergyPLAN**) требуют огромных вычислительных ресурсов.
- Многокритериальная оптимизация (стоимость vs. выбросы CO₂) особенно затратна по времени.
- Это тормозит анализ сценариев и принятие решений.

Решение: Гибридная оптимизационная модель

Идея: Заменить медленные расчеты EnergyPLAN на быструю **суррогатную модель на основе ML**.
Суррогатная модель "предсказывает" результаты EnergyPLAN за доли секунды.

Как это работает:

Фаза 1: Несколько тысяч сценариев оптимизируются на модели EnergyPLAN для обучения суррогатной модели.

Фаза 2: Обучается суррогатная ML-модель, которая заменяет EnergyPLAN, на которой генерируются сотни новых сценариев

Фаза 3: Выбранные сценарии, сформированные на суррогатной модели, снова запускаются на EnergyPLAN для проверки адекватности результатов.

Традиционные оптимизационные модели в ИИ эру

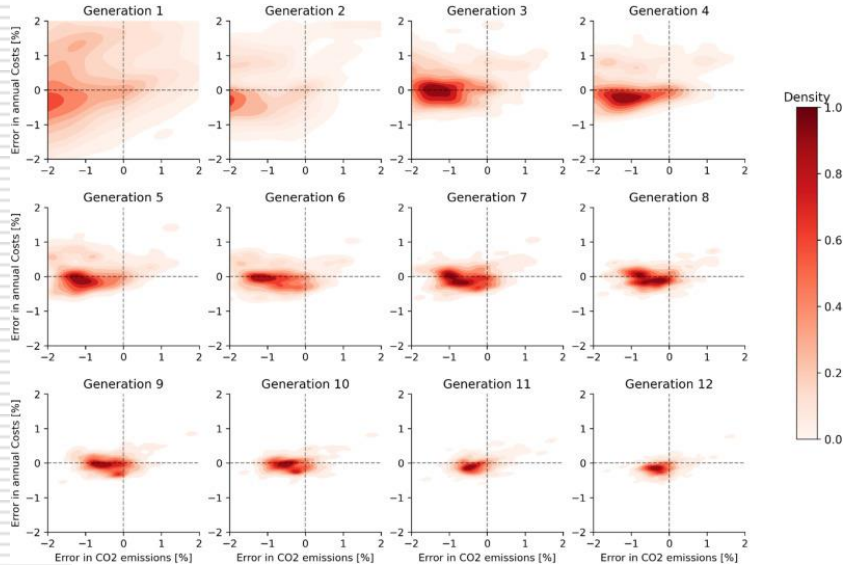


Fig. 2. Evolution of prediction error across generations for a Neural Network with a hidden layer size of 500, targeting total annual costs and CO2 emissions.

Лучшая ML-модель:

- Нейронная сеть (500 узлов в скрытом слое) показала наилучшую точность (>99%).
- Всего 2000 сценариев обучения достаточно для высокой точности модели.

Эффективность:

- Сокращение времени вычисления на 64% по сравнению со стандартной оптимизацией.
- Точность финальных решений практически не уступает традиционной оптимизации.

Практическая польза и применение:

- Метод позволяет проводить глубокий анализ неопределенностей (например, влияние цены газа).
- Значительно ускоряет процесс планирования и позволяет исследовать больше сценариев.

Основные пути использования ИИ в энергопланировании и моделях развития энергосистем

Интеграция на уровне отдельных модулей

ИИ расширяет или заменяет определенные функции

- **Автоматизированная обработка данных** – сбор и валидация данных, а также применение машинного обучения для устранения «пробелов» в данных.
- **Генерация сценариев** – ИИ может быстро разрабатывать тысячи правдоподобных сценариев будущего развития (сценарных условий).
- **Распознавание закономерностей** – выявление скрытых взаимосвязей в сложных взаимодействиях внутри системы (в т. ч. в результатах моделирования – кластеризация результатов).
- **Ускорение оптимизации** – поиск с использованием техник машинного обучения способен решать масштабные задачи до 10-1000 раз быстрее, чем традиционная оптимизация (суррогатное моделирование / гибридные модели).
- **Контроль качества** – автоматическое выявление аномалий в исходных данных и решениях.

Трансформация на системном уровне
переосмысление моделирования как процесса обучения, а не набора алгоритмов, основанных на правилах

- **Адаптивные самообучающиеся модели** – непрерывное совершенствование за счет новых данных без ручной перенастройки.
- **Динамическое моделирование в реальном времени** – обновление прогнозов и рекомендаций при изменении входной информации.
- **Вероятностное принятие решений** – учет неопределенностей и рисков, выход за пределы детерминистских подходов.
- **Кросс-доменное обучение** – применение знаний, полученных из схожих систем по всему миру, для уточнения локальных прогнозов.
- **Моделирование эмерджентного поведения** – учет сложных обратных связей, которые часто упускаются традиционными моделями.

Сейчас

В перспективе

Возможные риски и недостатки применения ИИ в энергопланировании

Качество данных и предвзятость

- Эффективность ИИ напрямую зависит от данных → некачественные или предвзятые исходные данные приводят к ошибочным рекомендациям.
- Пример: Если в исторических данных слабо представлены ВИЭ, система ИИ может занижать их потенциал.

Прозрачность и доверие

- Методы ИИ (особенно нейронные сети) могут работать по принципу «черного ящика», производя трудно объяснимые результаты.
- Это затрудняет для экспертов понимание результатов и их доведение до лиц, принимающих решения.

Вычислительные затраты на обучение

- Обучение агентов с подкреплением (RL) или больших нейросетей само по себе может требовать значительных ресурсов.
- Существует риск не устранения, а лишь переноса вычислительных «узких мест».

Чрезмерное обобщение (генерализация)

- ИИ может выучить закономерности, которые не работают за пределами обучающих данных.
- Пример: Агент с подкреплением (RL), обученный на данных энергосистемы одной страны, может оказаться неэффективным в другой.

«Чувствительные данные»

- Использование публичных моделей ИИ (LLM) может привести к утечкам данных
- Использование собственных моделей более безопасно, но часто нереалистично (затраты, ниже мощность, беднее возможности)
- Необходим компромисс между качеством, практичностью и безопасностью

Готовность к внедрению

- Специалистам по энергопланированию может не хватать компетенций или ресурсов для внедрения инструментов ИИ без внешней поддержки.
- Существует риск увеличения разрыва между передовыми и ресурсно-ограниченными организациями и регионами.

Преодоление недостатков ИИ в энергопланировании / Принципы внедрения ИИ

1. Соблюдение баланса между сложностью модели и удобством использования

Чрезмерно сложные решения на основе ИИ могут замедлить их внедрение, особенно среди нетехнических пользователей.

2. Приоритет прозрачности и интерпретируемости

Необходимо обеспечивать интерпретируемость моделей ИИ (Explainable AI, XAI) и доступность объяснения их результатов для не-экспертов, что способствует укреплению доверия и получению практических выводов.

3. Тщательная валидация моделей и устранение предвзятости

Следует устранять предвзятость – технологическую, региональную, и т.п. Необходимо сопоставлять результаты ИИ с реальными данными и признанными эталонами для обеспечения достоверности.

4. Инвестиции в обучение пользователей и развитие потенциала

Повышайте грамотность в области ИИ как у разработчиков моделей, так и у стейкхолдеров, чтобы обеспечить эффективное применение инструментов.

5. Старт с небольших пилотных проектов

Масштабируйте применение ИИ только после демонстрации явной, измеримой ценности и надежности в реальных условиях.

6. Используйте ИИ для дополнения, а не замены экспертных оценок (human-in-the-loop)

Сохраняйте человеческий контроль в критически важных процессах принятия решений.

Институт энергетических исследований РАН

www.eriras.ru

Андрей Хоршев,

к.э.н., вед. науч. сотрудник, руководитель Центра моделирования в энергетике

epos@eriras.ru

*Исследование выполнено в Институте энергетических исследований РАН за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-30013-П,
<https://rscf.ru/project/21-79-30013/>*

Спасибо за внимание!