

## Кластерный анализ характеристик развития стран-производителей ядерной энергии

Заявка № 1683633

На сегодняшний день атомная энергетика по данным Международного энергетического агентства составляет около 9% от мировой выработки электроэнергии [4], что является существенной долей, позволяющей говорить о важности атомной энергетике в мировом энергобалансе. В условиях ускорения энергетического перехода и ужесточения климатической повестки интерес к ядерной энергетике, как к стабильному и низкоуглеродному источнику энергии, существенно возрос. С учётом данного тренда развития, по прогнозам Международного агентства по атомной энергии, к 2050 году объем общемировых ядерно-энергетических мощностей может достигнуть от до 992 ГВт [1].

Существующие подходы к ранжированию стран-производителей ядерной энергии преимущественно базируются на одном, либо двух показателях, например, установленной мощности или годовой выработке. Такие подходы, будучи информативными для оценки масштабов генерации, не позволяют учесть качественные и структурные характеристики. Поэтому цель данного исследования - разработать методiku многомерной кластеризации стран-производителей ядерной энергии для выявления однородных групп и стратегий развития национальных ядерных комплексов.

Среди публикаций по теме исследования можно выделить работу таких авторов, как Вэйчжэн Конг, Яохуа Ван, Хунцай Дай и Люцзюнь Чжао, которая непосредственно рассматривает применение алгоритма k-средних для кластеризации потребления электроэнергии [3].

Также можно выделить крупное исследование, посвящённое кластерному анализу энергопотребления в странах Вышеградской группы [2].

На основе изученных источников и доступности баз данных [5, 6] для всех стран выборки отобраны следующие показатели, характеризующие уровень развития атомной энергетики:

X1: Установленная мощность (ГВт) — масштаб сектора энергетике; X2: Годовая выработка электроэнергии (ТВт\*ч) за 2024 г. — интенсивность использования мощностей; X3: Доля в энергобалансе (%) — значимость атомной генерации для национальной экономики; X4: Количество действующих энергоблоков (шт.) — масштаб энергосистемы; X5: Количество строящихся энергоблоков (шт.) — потенциал роста и инвестиционная активность; X6: Средний возраст реакторов (лет) — показатель технологической зрелости.

Анализ данных осуществлялся в несколько этапов с использованием пакета статистического анализа данных SPSS Statistics:

1. Предобработка данных. Ввиду несопоставимости единиц измерения переменных была проведена z-нормализация, приводящая все показатели к единой шкале со средним 0 и стандартным отклонением 1.

2. Определение оптимального числа кластеров. Был применен иерархический кластерный анализ методом Уорда. Оптимальное число кластеров определялось на основе анализа коэффициента слияния.

3. Кластеризация методом k-средних.

4. Интерпретация результатов. Для каждого выделенного кластера рассчитаны средние значения переменных, проведен дисперсионный анализ (ANOVA) для оценки значимости различий между кластерами.

Анализ коэффициентов слияния показал, что наиболее информативным и интерпретируемым является разбиение на четыре кластера: при переходе от 4 к 3 кластерам наблюдается скачкообразный рост внутрикластерной дисперсии, что свидетельствует о потере значимой информации. Таким образом были получены следующие кластеры:

Кластер 1: США и Франция - кластер характеризуется высокими значениями установленной мощности (2,84), выработки (2,79) и количества действующих энергоблоков (2,89). Доля в энергобалансе также значительно выше средней (1,76). Ключевой особенностью является отрицательная динамика строительства (-0,28) при высоком среднем возрасте реакторов (1,21). Кластер представляет страны со сложившейся ядерной энергосистемой, которая функционирует в режиме поддержания мощностей, а не их активного наращивания.

Кластер 2: Китай и Индия - кластер отличается максимальным значением строящихся энергоблоков (3,48), что свидетельствует о фазе активного расширения ядерной энергетики. Установленная мощность (1,26) и выработка (1,18) выше средних, однако доля в энергобалансе (-0,78) существенно ниже средней, что указывает на опережающий рост энергопотребления в целом. Средний возраст реакторов находится на минимальном уровне (-1,94).

Кластер 3: Россия и Южная Корея - кластер характеризуется высокими показателями установленной мощности (0,91), выработки (0,96) и доли в балансе (0,94). Показатель количества строящихся энергоблоков (1,14) значительно превышает среднемировой уровень. Средний возраст реакторов (-0,43) ниже среднего благодаря программам модернизации и нового строительства.

Кластер 4: Объединяет оставшиеся 25 из 31 стран выборки, чьи показатели находятся на уровне ниже средних. Для данных стран ядерная энергетика не играет доминирующую роль в энергобалансе.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение метода кластеризации при анализе стран-производителей ядерной энергии преодолевает ограничения одномерных рейтингов и позволяет выделить устойчивые характеристики и направления развития ядерной энергетики отдельных групп стран.

### Источники и литература

- 1) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 International atomic energy agency Vienna, 2025, 137 p.
- 2) Gostkowski, M.; Rokicki, T.; Ochnio, L.; Koszela, G.; Wojtczuk, K.; Ratajczak, M.; Szczepaniuk, H.; Bórawski, P.; Beldycka-Bórawska, A. Clustering Analysis of Energy Consumption in the Countries of the Visegrad Group. *Energies* 2021, 14, 5612
- 3) Weizheng Kong, Yaohua Wang, Hongcai Dai, LiuJun Zhao. Analysis of energy consumption structure based on K-means clustering algorithm. *Energies* 2021, 14, 5612
- 4) International Energy Agency. World Energy Outlook 2025: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- 5) Statistical Review of World Energy. The Energy Institute: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- 6) The Database on Nuclear Power Reactors. IAEA: <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>