

А. О. Карюк^{1✉}, А. А. Карташевич²

Энергетическая бедность как фактор стрессоустойчивости ТЭК

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,

г. Кемерово, Российская Федерация

e-mail: a.karyuk@g.nsu.ru

Аннотация. Энергетическая бедность рассматривается как один из факторов, влияющих на стрессоустойчивость топливно-энергетического комплекса. В статье анализируются теоретические и прикладные подходы к измерению энергетической бедности, а также сравниваются результаты собственного индекса, построенного методом главных компонент, с многомерным индексом MEPI и внешним показателем бедности. Эмпирическая часть исследования основана на сравнении данных по 194 странам мира за период 1990-2024 гг. Показано, что выбор методики существенно влияет на интерпретацию уровня энергетической бедности и на выводы о устойчивости энергетической системы к внешним изменениям. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что энергетическая бедность может служить индикатором уязвимости ТЭК и использоваться при оценке его адаптивности к экономическим, социальным и ценовым изменениям.

Ключевые слова: энергетическая бедность, ТЭК, метод главных компонент, MEPI, сравнительный анализ

А. О. Karyuk^{1✉}, А. А. Kartashevich²

Energy poverty as a factor in the resilience of the fuel and energy complex

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS, Kemerovo, Russian Federation

e-mail: a.karyuk@g.nsu.ru

Abstract. Energy poverty is considered one of the factors affecting the resilience of the fuel and energy complex. The article analyzes theoretical and applied approaches to measuring energy poverty and compares the results of a proprietary index, constructed using principal component analysis, with the Multidimensional Energy Poverty Index (MEPI) and an external poverty indicator. The empirical part of the study is based on a comparison of data from 194 countries for the period 1990–2024. It is shown that the choice of methodology significantly influences the interpretation of energy poverty levels and conclusions regarding the energy system's resilience to external changes. The results suggest that energy poverty can serve as an indicator of the fuel and energy complex's vulnerability and be used to assess its adaptability to economic, social, and price changes.

Keywords: energy poverty, fuel and energy complex, principal component analysis, MEPI, comparative analysis

Введение

Энергетическая бедность остается одной из ключевых глобальных проблем, связанной с ограниченным доступом населения к современным, надежным и

экологически безопасным источникам энергии. Впервые термин «энергетическая бедность» был формализован Б. Бордманом в 1991 г., который предложил «правило 10%» – домохозяйство считается энергетически бедным, если его расходы на энергию превышают 10% дохода [1]. В дальнейшем подход был развит Дж. Хиллсом (LINC – Low Income High Cost, 2012) и дополнен многомерными индексами, такими как MEPI [2], учитывающими не только финансовую доступность, но и физический доступ к услугам (электричество, чистое топливо и др.).

Современные исследования демонстрируют разнообразие методологических подходов. В работах анализируют пространственную уязвимость на городском уровне через композитные индексы (социальные, жилищные, энергетические факторы). Ailinsa применяет PCA для странового рейтинга ЕС-27, формируя веса индикаторов на основе корреляционной структуры данных. Sheikh et al. используют композитные индексы в панельных регрессиях для выявления макроэкономических драйверов EP в Европе. Rizal et al. национальные многомерные индексы на основе Alkire-Foster [2] методологии с декомпозицией по регионам и типам домохозяйств.

Международные организации активно занимаются мониторингом проблемы: ООН включила борьбу с энергетической бедностью в ЦУР 7 «Доступ к недорогим и чистым источникам энергии», МЭА в отчете Energy Access Outlook 2017 [5] оценило, что 1,1 млрд человек (15% населения мира) не имеют доступа к электричеству. Особую актуальность проблема приобретает в контексте энергетических кризисов 2021–2022 гг. и геополитических потрясений.

Нерешенные проблемы включают отсутствие единого методологического подхода к измерению энергетической бедности. Пороговые методы просты, но игнорируют климатические, энергетические и социальные факторы. Многомерные индексы (MEPI, MPI) лучше отражают суть явления, но требуют качественных данных на уровне домохозяйств. Статистические методы (PCA, факторный анализ), позволяющие объективно присваивать веса индикаторам, недостаточно широко применяются в исследованиях энергетической бедности на глобальном уровне. [3]

Цель исследования – разработать и сравнить математические модели количественной оценки энергетической бедности на основе метода главных компонент (PCA) [3, 4], индекса MEPI и внешнего показателя бедности для странового анализа 194 стран за 1990–2024 гг.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести обзор существующих подходов к измерению энергетической бедности.
2. Формализовать математические модели PCA и MEPI.
3. Построить собственный индекс энергетической бедности методом PCA.
4. Провести сравнительный анализ полученных результатов.

Теоретическая значимость заключается в математической формализации и сравнении различных подходов к измерению энергетической бедности, а также в разработке собственной модели PCA для глобального странового анализа.

Практическая значимость – результаты позволяют ранжировать страны по уровню энергетической уязвимости, выявить наиболее проблемные из них и оценить влияние энергетической бедности на стрессоустойчивость ТЭК, что может быть использовано для разработки адресных мер энергетической политики.

Методы и материалы

Эмпирическая база исследования включает 16 социально-экономических и энергетических индикаторов для 194 стран мира за период 1990–2024 гг (рис.1). Данные собраны из открытых источников: World Bank Open Data, International Energy Agency, Our World in Data [6]. Общий объем панельных данных – более 300 тыс. наблюдений (страна-год).

Индикаторы доступа энергии	Индикаторы потребления энергии	Индикаторы источников энергии	Социально-экономические индикаторы
Доступ к электричеству, % населения	Потребление электроэнергии, кВт·ч на человека	Производство электроэнергии из возобновляемых источников, % от общего производства электроэнергии	ВВП на душу населения по ППС, международные доллары
Доступ к электричеству в городских районах, % городского населения	Потребление энергии на душу населения, кг нефтяного эквивалента на человека	Производство электроэнергии из нефти, газа и угля, % от общего объема	Потребительские расходы домохозяйств и НКО на душу населения, постоянные доллары США 2015 года
Доступ к чистым видам топлива и технологиям для приготовления пищи, % населения		Потребление возобновляемой энергии, % от общего конечного потребления энергии	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении, лет
		Потребление ископаемого топлива, % от общего потребления энергии	Доля городского населения, % от общей численности населения
			Индекс Джини
			Безработица, % от общей численности рабочей силы
			Охват начальным школьным образованием, % валового охвата

Рис. 1. Отобранные индикаторы.

Отбор индикаторов проводился с учетом трех критериев:

1. Отражение различных аспектов энергетической бедности.
2. Низкая корреляция между индикаторами.
3. Доступность данных для большинства стран за длительный период.

Для предобработки данных выполнена унификация шкалы для разнонаправленных показателей [2]:

1. при прямой зависимости:

$$\tilde{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (1)$$

2. при обратной зависимости:

$$\tilde{X} = \frac{X_{max} - X}{X_{max} - X_{min}}, \quad (2)$$

3. центрирование:

$$\tilde{\tilde{X}} = \tilde{X} - \bar{\tilde{X}}, \quad (3)$$

где X это наблюдение выбранного индикатора определённой страны в определённый год.

Построение сводного индекса на основе метода главных компонент (PCA) [4]:

$$EP_i = \sum_{j=1}^p w_j \tilde{\tilde{X}}_{ij}, \quad (4)$$

где EP_i – значение сводного индекса энергетической бедности для i -го объекта наблюдения, то есть для страны в конкретный год; i – индекс наблюдения, (страна–год); j – номер индикатора; p – число использованных индикаторов; $\tilde{\tilde{X}}_{ij}$ – стандартизированное значение j -го индикатора для i -го наблюдения; w_j – вес j -го индикатора, заданный нагрузкой первой главной компоненты PCA.

Значение сводного индекса EP_i отражает отрицательную связь с энергетической бедностью – чем значение индекса меньше, тем больше страна считается «энергетически бедной».

Индекс MEPI:

$$MEPI_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad (5)$$

где $MEPI_i$ – значение многомерного индекса энергетической бедности для i -го наблюдения; i – страна–год; j – номер индикатора; m – число бинарных индикаторов, включённых в индекс. x_{ij} – бинарная переменная: 1, если по j -му признаку у i -го наблюдения есть депривация; 0, если депривации нет.

Значение сводного индекса $MEPI_i$ отражает положительную связь с энергетической бедностью – чем значение индекса больше, тем больше страна считается «энергетически бедной».

Для валидации моделей использована корреляция:

$$\text{corr}(EP, Y) = \frac{\sum (EP_i - \overline{EP})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (EP_i - \overline{EP})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (6)$$

Вычисления выполнены в Python 3.9 с использованием библиотек pandas, numpy, scikit-learn (PCA), matplotlib, seaborn.

Результаты

В ходе исследования были рассчитаны несколько сводных показателей на основе метода главных компонент и многомерного индекса энергетической бедности. Для каждой PCA-модели была получена первая главная компонента, а также рассчитана доля объяснённой ею дисперсии (рис.2).

Модель	Количество используемых индикаторов	Доля объяснённой дисперсии первой главной компоненты
pca_energy	5	83.41%
pca_structure	4	66.15%
pca_context	7	47.02%
pca_extended	16	39.07%

Рис. 2. Сводные показатели PCA.

По результатам PCA были получены нагрузки исходных индикаторов на первую главную компоненту. В модели «pca_energy» наибольшие значения нагрузок получили показатели, связанные с доступом к электричеству, потреблением электроэнергии, доступом к чистым видам топлива и общим энергопотреблением на душу населения. В модели «pca_structure» наибольшие по модулю нагрузки получили показатели, характеризующие долю возобновляемой электроэнергии и долю электроэнергии из ископаемых источников. В модели «pca_extended» наибольшие нагрузки получили показатели, отражающие доход на душу населения, энергопотребление, доступ к электричеству, доступ к чистым видам топлива и ожидаемую продолжительность жизни.

Дополнительно был рассчитан многомерный индекс энергетической бедности «meri_index», основанный на порогах депривации по набору энергетических индикаторов.

Для всех полученных показателей были сформированы рейтинги стран по значениям индексов за отдельные годы. Также были построены временные ряды изменения индексов по странам за период наблюдения (рис. 3). Для оценки полноты данных было рассчитано число лет наблюдений по каждой стране.

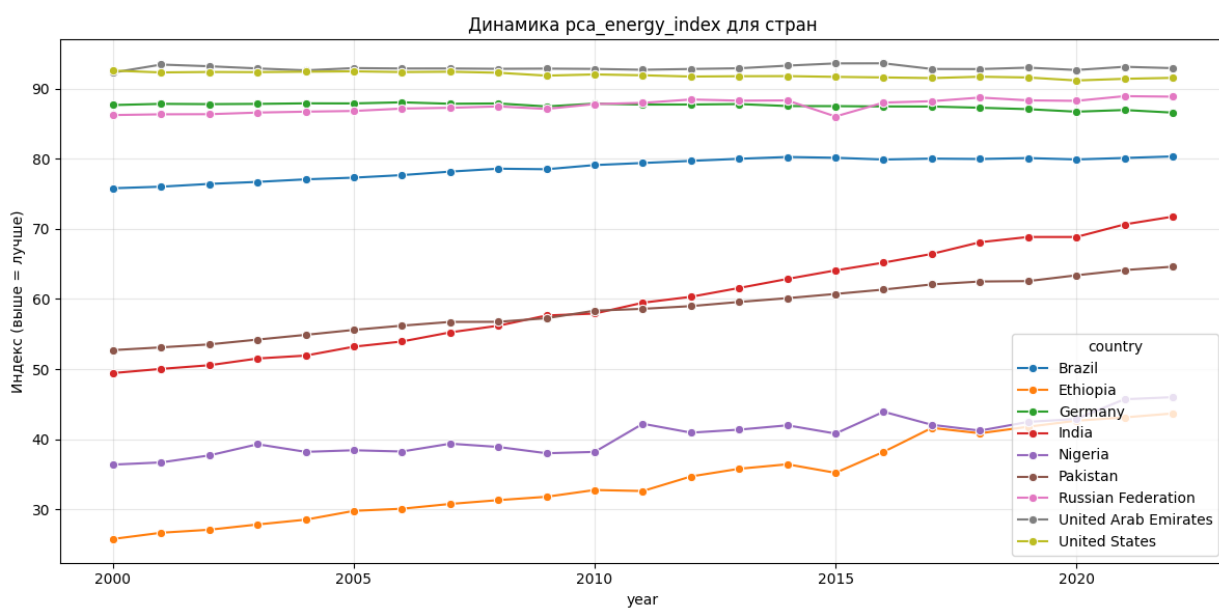


Рис. 3. Динамика индекса энергетической бедности РСА.

Для проверки согласованности результатов была построена матрица парных корреляций между рассчитанными индексами (рис. 4).

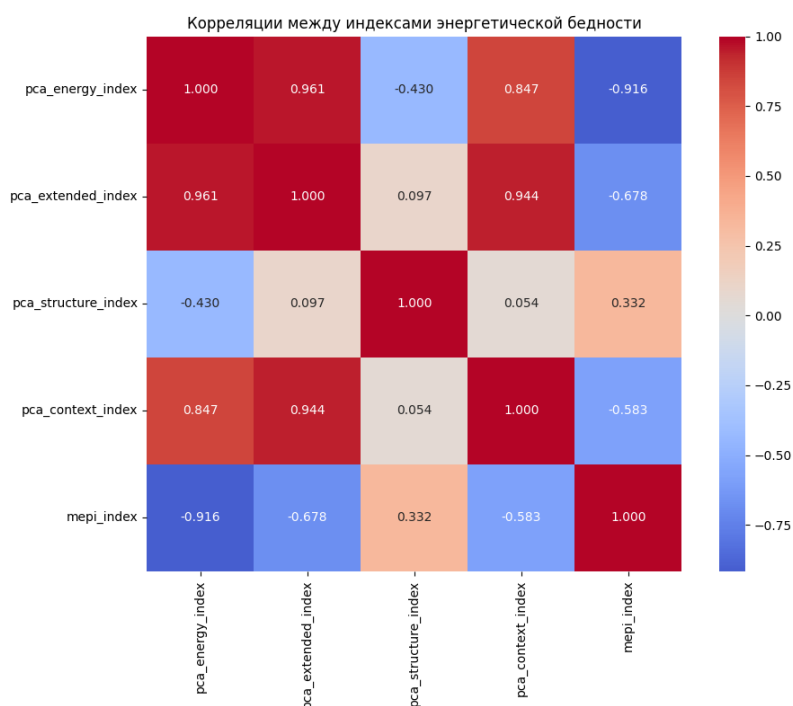


Рис. 4. Корреляции между индексами ЭБ.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую интерпретируемость модели «pca_energy» (83.41% объяснённой дисперсии PC1), что согласуется с выводами

Nussbaumer et al. (2012), где базовые энергетические индикаторы также формировали компактную главную компоненту. Более низкая доля дисперсии в «рса_extended» (39.07%) объясняется включением разнородных социально-экономических показателей, что соответствует результатам исследований по многомерной бедности Alkire-Foster (2011), где расширение набора переменных снижало вклад первой компоненты.

Сравнение с МЕРІ подтверждает устойчивость РСА-подхода: корреляции между индексами значимы, но не полные, что указывает на комплементарность методов. Рейтинги стран по энергетической бедности в целом совпадают с данными Всемирного банка и МЭА. Предполагается, что различия в динамике индексов отражают различия в темпах электрификации и перехода на чистые топлива.

Заключение

В работе разработана система из пяти индексов энергетической бедности на основе РСА и МЕРІ, из которых «рса_energy» индекс показал наилучшие статистические характеристики (83.41% дисперсии PC1). Методология позволяет ранжировать страны по уровню энергетической обеспеченности и отслеживать динамику за 1990–2025 годы.

Полученные рейтинги и факторные нагрузки подтверждают, что энергетическая бедность тесно связана с доступом к электричеству и чистым топливам, а не только с ВВП.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-18-00647, <https://rscf.ru/project/25-18-00647/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boardman B. Fuel poverty: from cold homes to affordable warmth. London: Belhaven Press. – 1991. – 268 с.
2. Alkire S., Foster J. Counting and Multidimensional Poverty Measurement // Journal of Public Economics. – 2011. – Vol. 95. – № 7(8). – P. 476-487.
3. Айвазян С.А., Енюков И.С., Хрусталеv М.М. Компьютерные методы анализа и моделирования. Минск. – 1998. – Т. 2. – 201 с.
4. Sehgal S. et al. Data analysis using PCA // MedCom. – 2014. – P. 45-48.
5. OECD. Energy Access Outlook 2017: From Poverty to Prosperity. Paris: IEA. – 2017. – 136 с.
6. The World Bank Open Data. URL: <https://www.worldbank.org/en/home> (дата обращения 14.04.2026)

© А. О. Карюк, А. А. Карташевич, 2026