

# Нечеткая оценка рисков устойчивости сырьевого обеспечения атомной энергетики: страновой анализ

В. В. Виноградова

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

vv-vinogr@yandex.ru

Е. В. Кильдюшов

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

evgenii.kildiushov@gmail.com

Я. О. Соколов

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*

sokolov.iaroslavolegovich@yandex.ru

**Аннотация.** В статье предложен подход к межстрановой оценке рисков устойчивости сырьевого обеспечения атомной энергетики на основе нечеткой логики. В качестве ключевых факторов рассмотрены импортозависимость по урану, доля атомной генерации в энергобалансе и давление расширения ядерной программы. На основе разработанной нечеткой модели выполнено ранжирование стран по уровню риска. Показано, что наибольшая уязвимость характерна для стран с высокой зависимостью от внешних поставок урана при значимой роли атомной энергетики или активном наращивании мощностей. Предложенный подход может использоваться для сравнительного анализа устойчивости обеспечения ураном в международной практике.

**Ключевые слова:** атомная энергетика; обеспечение ураном; устойчивость сырьевого обеспечения; нечеткая логика; страновой анализ; импортозависимость; ядерное топливо; оценка рисков

## I. ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость обеспечения урановым сырьем становится значимым условием развития атомной энергетики. Рост мирового числа действующих и строящихся энергоблоков повышает потребность в природном уране, тогда как добыча сосредоточена в ограниченном числе стран. При этом одинаковые значения отдельных показателей не отражают всей конфигурации риска, поскольку страны различаются по степени импортозависимости, роли атомной генерации в энергобалансе и темпам расширения мощностей. Цель исследования состоит в разработке межстранового подхода к оценке рисков устойчивости уранового обеспечения атомной энергетики на основе нечеткой логики. В работе используются показатели внутреннего покрытия потребности, зависимости от импорта, доли атомной генерации и давления расширения ядерной программы. Научная новизна состоит в построении компактной нечеткой модели, позволяющей интегрировать эти факторы в единый индекс риска и ранжировать страны по степени уязвимости.

## II. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### A. Глобальный контекст и значимость устойчивости ядерного топливного цикла

В условиях глобального энергетического перехода и стремления к достижению углеродной нейтральности к 2050 году, атомная энергетика усиливает свою роль в структуре низкоуглеродной энергетики. Более 30 стран,

включая ведущие экономики мира, заявили о планах утроения мощностей атомной генерации, рассматривая ее как критически важный источник покрытия базовой нагрузки энергосистемы. Однако реализация этих планов напрямую зависит от устойчивости и безопасности цепочки поставок природного урана как основного сырьевого ресурса ядерного топливного цикла. Современный рынок урана характеризуется высокой степенью концентрации производства, сложной логистикой и усиливающейся геополитической фрагментацией, что выводит сырьевое обеспечение за рамки рыночных механизмов и придает ему значение фактора национальной и международной энергетической безопасности [1, 2].

Анализ устойчивости в данном контексте требует расширения рамок традиционных экономических моделей. Понятие устойчивости сырьевого обеспечения включает наличие достаточной ресурсной базы, экологическую безопасность добычи, социальную приемлемость проектов, а также техническую готовность к внедрению инновационных технологий переработки и обогащения [3]. Оценка указанных факторов осложняется высокой степенью неопределенности, поскольку геополитические риски, изменения в регуляторной среде и социальные настроения носят качественный и трудноформализуемый характер. Это обуславливает необходимость применения методов нечеткой логики и нечеткого многокритериального анализа, позволяющих учитывать экспертные оценки и неопределенность исходных данных [4].

### B. Аспекты устойчивости сырьевого обеспечения атомной энергетики

Концепция устойчивости в атомной отрасли рассматривается в рамках четырех аспектов: экономического, экологического, социального, технологического [5, 6]. Экономическая устойчивость определяется себестоимостью добычи урана в виде оксида урана ( $U_3O_8$ ) и эффективностью его использования на протяжении всего цикла. Переход к замкнутому ядерному топливному циклу с использованием реакторов на быстрых нейтронах повышает энергоотдачу за счет вовлечения урана-238. Сценарии с переработкой отработанного ядерного топлива и многократной рециркуляцией плутония снижают потребность в природном уране [7].

Экологическая устойчивость определяется управлением отходами, защитой подземных вод и рекультивацией территорий [8, 9]. Метод подземного скважинного выщелачивания снижает воздействие на поверхность и образование отвалов пустой породы и хвостохранилищ. При этом требуется контроль гидрогеологических условий для предотвращения миграции выщелачивающих растворов за пределы рудного тела [10].

Социальная устойчивость определяется уровнем поддержки проектов со стороны местных сообществ. Практика реализации проектов в Канаде показывает, что недостаточная поддержка коренных народов приводит к задержкам или даже к отказу от реализации проектов независимо от их экономических параметров [11].

### С. Факторы устойчивости сырьевого обеспечения атомной энергетики

Риски сырьевого обеспечения атомной энергетики формируются под воздействием внешних и внутренних факторов, отражающих условия функционирования отрасли и ограничения цепочек поставок [12]. Геополитические риски выступают ключевым фактором рыночной волатильности. Концентрация добычи урана в ограниченном числе стран повышает вероятность нарушения поставок и усиливает неопределенность для потребителей. Санкционные ограничения и торговые барьеры дополнительно усиливают эти риски. Более 70% мировой добычи урана приходится на Казахстан, Канаду и Австралию, что формирует зависимость рынка от ограниченного круга поставщиков. Ограниченность маршрутов транспортировки радиоактивных материалов усиливает уязвимость поставок к транзитным рискам [13].

Экономические и рыночные риски определяют условия инвестирования в отрасли [14, 15]. Волатильность спотовых цен затрудняет долгосрочное планирование и разработку новых месторождений [16, 17]. Рост производственных издержек, обусловленный удорожанием энергоносителей, химических реагентов и рабочей силы, приводит к увеличению себестоимости добычи и росту LCOE [18, 19].

Технические риски обусловлены дефицитом мощностей и технологических возможностей на стадиях конверсии и обогащения урана. Регуляторные ограничения, связанные с длительными процедурами лицензирования и экологического согласования, замедляют ввод новых мощностей и снижают гибкость предложения. Дополнительный риск связан с развитием реакторов нового типа, требующих топлива с повышенным уровнем обогащения, производство которого в коммерческих масштабах на данный момент сосредоточено в России, что усиливает зависимость рынка от ограниченного числа поставщиков [20].

### III. МЕТОДОЛОГИЯ

Методология межстрановой оценки строится для страны  $i$  на основе трех входных факторов, приведенных к диапазону  $[0;1]$ : коэффициент импортозависимости, доля атомной генерации и давление расширения ядерной программы. Исходная база включает годовую потребность атомной энергетики в уране  $U_i$ , внутреннюю добычу урана  $P_i$ , долю атомной генерации в производстве электроэнергии  $S_i$ , идентифицированные

ресурсы урана  $R_i$ , действующую мощность реакторов  $OP_i$  и строящуюся мощность  $UC_i$ . На первом этапе рассчитываются детерминированные индикаторы. Коэффициент внутреннего покрытия определяется как:

$$DCR_i = \frac{P_i}{U_i} \quad (1)$$

Коэффициент импортозависимости определяется как:

$$ID_i = \max\left(0, \frac{U_i - P_i}{U_i}\right). \quad (2)$$

Значение 0 соответствует полному внутреннему покрытию потребности, значение 1 соответствует полной зависимости от внешних поставок.

Доля атомной генерации нормируется как:

$$NS_i = \frac{S_i}{100}. \quad (3)$$

Давление расширения ядерной программы определяется как:

$$EP_i = \frac{UC_i}{(OP_i + UC_i)}. \quad (4)$$

При наличии данных о ресурсной базе рассчитывается показатель долгосрочной обеспеченности:

$$RRY_i = \frac{R_i}{U_i} \quad (5)$$

Интегральный риск  $y_i$  оценивается нечеткой системой вывода Мамдани первого типа с тремя входами  $x_1 = ID_i$ ,  $x_2 = NS_i$ ,  $x_3 = EP_i$  и одним выходом  $y_i \in [0;1]$ . Для каждого входа задаются три лингвистических термина: *low*, *medium*, *high*. Для крайних термов используются плечевые трапециевидные функции принадлежности, для среднего термина используется треугольная функция. Для  $ID_i$  приняты интервалы *low*  $[0; 0; 0,20; 0,40]$ , *medium*  $[0,20; 0,50; 0,80]$ , *high*  $[0,60; 0,80; 1,00; 1,00]$ . Для  $NS_i$  приняты интервалы *low*  $[0; 0; 0,05; 0,15]$ , *medium*  $[0,05; 0,20; 0,45]$ , *high*  $[0,30; 0,45; 1,00; 1,00]$ . Для  $EP_i$  приняты интервалы *low*  $[0; 0; 0,05; 0,15]$ , *medium*  $[0,05; 0,25; 0,55]$ , *high*  $[0,35; 0,55; 1,00; 1,00]$ . Для выходной переменной *Risk* используются интервалы *low*  $[0; 0; 0,20; 0,40]$ , *medium*  $[0,25; 0,50; 0,75]$ , *high*  $[0,60; 0,80; 1,00; 1,00]$ .

Треугольная функция принадлежности задается как:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a < x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } b < x \leq c, \\ 0, & \text{if } x > c. \end{cases} \quad (6)$$

Трапециевидная функция принадлежности задается как:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad (7)$$

Для плечевых функций крайние участки принимают значение 1 на границе диапазона.

База правил включает 27 комбинаций, то есть  $3^3$  сочетаний трех термов для трех входов. Логика правил монотонна. Рост  $ID_i$ ,  $NS_i$  и  $EP_i$  повышает итоговый риск. Для  $p$ -го правила степень активации определяется как:

$$a_p = \min(\mu_{Ap1}(x_1), \mu_{Ap2}(x_2), \mu_{Ap3}(x_3)). \quad (8)$$

Агрегированная выходная функция определяется как:

$$u_{R(y)} = \max_p(\min(\alpha_p, \mu_{Bp}(y))). \quad (9)$$

Дефазификация выполняется методом центра тяжести:

$$Risk_i = \frac{\int_0^1 y \mu_R(y) dy}{\int_0^1 \mu_R(y) dy}. \quad (10)$$

Итоговый индекс интерпретируется по шкале 0,00–0,33 как низкий риск, 0,34–0,66 как средний риск, 0,67–1,00 как высокий риск.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе рассматривались данные по 34 странам. В итоговый расчет нечеткого риска вошли 33 страны, поскольку для Египта потребность в уране в 2025 г. равна нулю. Анализ показывает, что межстрановые различия формируются прежде всего следующим блоком факторов: сырьевая обеспеченность за счет добычи, коэффициент внутреннего покрытия, коэффициент импортозависимости, идентифицированные ресурсы и годы покрытия текущей потребности. Ключевые проанализированные показатели представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Группа	Число стран	Диапазон NS	Диапазон DCR	Диапазон ID	Диапазон EP
Полная импортозависимость и высокая роль атомной генерации	11	0,31 - 0,67	0	1	0 - 0,385
Полная импортозависимость и высокое давление расширения	6	0,00 - 0,17	0	1	0,25 - 1
Полная импортозависимость без выраженного расширения	9	0,02 - 0,29	0	1	0 - 0,08
Частичное внутреннее покрытие	6	0,03 - 0,52	0,014 - 0,712	0,288 - 0,986	0,000 - 0,454
Избыточное внутреннее покрытие	1	0,13	9,834	0	0

Источник: составлено авторами по данным<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Uranium Production by Country // World Nuclear Association: [сайт]. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-by-country> (дата обращения: 22.03.2026).

Нечеткая модель на основе факторов  $ID$ ,  $NS$  и  $EP$  разделила страны на три группы. В категорию высокого риска вошли 11 стран, в категорию среднего риска 20 стран, в категорию низкого риска 2 страны. Среднее значение  $Risk$  в выборке составило 0,586, медиана 0,500. Высокий риск концентрируется там, где полная импортозависимость сочетается с высоким давлением расширения ядерной программы или с заметной ролью атомной генерации в энергобалансе.

ТАБЛИЦА II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТРАН ПО КАТЕГОРИЯМ ИТОГОВОГО РИСКА

Категория риска	Число стран	Годовая потребность, т	Доля потребности от суммы по выборке, %	Средний Risk	Средний ID	Средний NS	Средний EP
Высокий	26	58 357	84,67	0,83	0,97	0,27	0,23
Средний	5	8 827	12,81	0,53	0,91	0,08	0,05
Низкий	2	1 736	2,52	0,17	0,14	0,09	0,00

Группа высокого риска отличается прежде всего высоким значением  $EP$ , поскольку  $ID$  близок к единице и у значительной части средней группы. Средний  $EP$  в высокой группе составляет 0,412 против 0,033 в средней группе. Данный факт показывает, что для текущей конфигурации модели главным усилителем риска выступает расширение ядерной программы при дефиците собственного сырьевого обеспечения.

ТАБЛИЦА III. СТРАНЫ С НАИБОЛЬШИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ИТОГОВОГО РИСКА

Страна	Потребность, т	ID	NS	EP	Risk	Категория
Бангладеш	179	1	0	1	0,84	Высокий
Турция	620	1	0	1	0,84	Высокий
Франция	8 389	1	0,67	0	0,84	Высокий
Испания	1 218	1	0,2	0	0,84	Высокий
Румыния	183	1	0,2	0	0,84	Высокий
Иран	149	1	0,02	0,54	0,84	Высокий
ОАЭ	902	1	0,22	0	0,84	Высокий
США	19 011	0,98	0,18	0	0,84	Высокий
Пакистан	521	1	0,17	0,25	0,836	Высокий
Болгария	338	1	0,46	0	0,836	Высокий

Максимальные значения  $Risk$  у Бангладеш и Турции формируются из полного импортного характера обеспечения ураном и предельного значения  $EP = 1$ . В этих случаях строящаяся мощность равна всей мощности национальной программы, поэтому модель фиксирует максимальное давление будущего спроса. У Пакистана, Ирана и Великобритании уровень риска также определяется сочетанием  $ID=1$  с нулевым и достаточно высоким  $EP$ . У Словакии и Венгрии повышенное значение  $Risk$  достигается при нулевом  $EP$ . Здесь определяющим фактором выступает высокая доля атомной генерации в национальном энергобалансе. Китай занимает особое положение. Формирование высокого уровня риска связано с сочетанием значительной потребности в уране, большого объема строящихся мощностей и недостаточного внутреннего

<sup>2</sup> Supply of Uranium // World Nuclear Association: [сайт]. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium/> (дата обращения: 22.03.2026).

<sup>3</sup> PRIS - Reactor status reports - In Operation & Suspended Operation - By Country // IAEA PRIS: [сайт]. URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> (дата обращения: 22.03.2026).

покрытия текущего спроса. Бразилия демонстрирует высокий риск при крупной ресурсной базе.

Нижняя часть распределения представлена Канадой и ЮАР. У Канады *Risk* составляет 0,153. При потребности 1 455 т страна добывает 14 309 т, коэффициент внутреннего покрытия равен 9,834, а импортозависимость равна нулю. У ЮАР *Risk* составляет 0,171 при  $DCR = 0,712$  и  $ID = 0,288$ . Обе страны не имеют давления расширения ядерной программы, что дополнительно снижает риск. Россия занимает промежуточное положение. Ее *Risk* равен 0,408. При добыче 2 738 т и потребности 6 251 т коэффициент внутреннего покрытия достигает 0,438, импортозависимость составляет 0,562, а давление расширения ядерной программы равно 0,131. Украина также относится к средней зоне с  $Risk = 0,549$ . Ее позиция определяется частичным внутренним покрытием,  $DCR = 0,324$ , но при высокой доле атомной генерации, 0,520.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты показали, что риск устойчивости  $J$  обеспечения ураном определяется сочетанием трех факторов: импортозависимости, доли атомной генерации и давления расширения ядерной программы. Наибольшие значения индекса характерны для стран, где высокая зависимость от внешних поставок сочетается либо с существенной ролью атомной энергетики в энергобалансе, либо с активным вводом новых мощностей. Низкий риск зафиксирован у стран с собственной добычей урана и отсутствием выраженного давления расширения ядерной программы. Предложенная нечеткая модель позволяет перейти от раздельного анализа показателей к интегральной межстрановой оценке и может использоваться для сопоставления устойчивости обеспечения ураном в атомной энергетике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Costa Peluzo B.M., Kraka E. Uranium: The Nuclear Fuel Cycle and Beyond. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, i. 9, pp. 4655. DOI: 10.3390/ijms23094655
- [2] Pashkevich N.V., Khloponina V.S., Pozdnyakov N.A., Avericheva A.A. Analysing the problems of reproducing the mineral resource base of scarce strategic minerals. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 270, pp. 1004-1023. EDN HNTQBF
- [3] Yurak V.V., Dushin A.V., Mochalova L.A. Vs sustainable development: scenarios for the future. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 242, pp. 242-247. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.242
- [4] Moon H., Mirmotalebi S., Jang Y., Ahn Y., Kwon N. Risk Evaluation of Radioactive Concrete Structure Decommissioning in Nuclear Power Plants Using Fuzzy-AHP. *Buildings*, 2024, vol. 14, i. 6, pp. 1536. DOI: 10.3390/buildings14061536
- [5] Marinina O.A., Plyushin Y.V., Kildiushov E.V. Comprehensive Analysis and Forecasting of Indicators of Sustainable Development of

- Nuclear Industry Enterprises. *International Journal of Engineering*, 2025, vol. 38, i. 11, pp. 2527-2536. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.05
- [6] Stroykov G., Lebedev A., Belous A., Kolganova E. Achieving Sustainable Development Goals Through Hybrid Energy Supply Systems in Mining: The Case of the Varvarinskoye Copper–Gold Deposit. *Resources*, 2026, vol. 15, i. 2, pp. 25. DOI: 10.3390/resources15020025
- [7] Khan I., Tan D., Hassan S.T., Bilal. Role of alternative and nuclear energy in stimulating environmental sustainability: impact of government expenditures. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, i. 25, pp. 37894-37905. DOI: 10.1007/s11356-021-18306-4
- [8] Semenova T., Churrana N. Assessment of the Projects' Prospects in the Economic and Technological Development of the Oil and Gas Complex in the Republic of Mozambique. *Resources*, 2025, vol. 14, i. 7, pp. 106. DOI: 10.3390/resources14070106
- [9] Iyushin Y., Talanov N. Development of Methods and Models for Assessing Technical Condition of Mines and Underground Structures. *International Journal of Engineering*, 2025, vol. 38, i. 7, pp. 1659-1666. DOI: 10.5829/ije.2025.38.07a.16
- [10] Li Y., Zhang C., Tang Z., Li C., Liu Z., Tan K., Liu L. Hydrodynamics control for the well field of in-situ leaching of uranium. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, vol. 56, i. 10, pp. 4176-4183. DOI: 10.1016/j.net.2024.05.021
- [11] Dossa K.F., Vodouhe F.G., Khasa D.P. Social Acceptability of Critical and Strategic Minerals (CSMs) Development: A Systematic Review with a Particular Focus on Quebec, Canada. *Mining*, 2025, vol. 5, i. 1, pp. 4. DOI: 10.3390/mining5010004
- [12] Iyushin Y.V., Nosova V.A. Development of Mathematical Model for Forecasting the Production Rate. *International Journal of Engineering*, 2025, vol. 38, i. 8, pp. 1749-1757. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.02
- [13] Todorova N. Uranium sector sensitivity to financial and geopolitical risks. *Economics Letters*, 2025, vol. 255, pp. 112475. DOI: 10.1016/j.econlet.2025.112475
- [14] Materova E.S., Aksenova Z.A., Pasternak S., Zhironkin S.A., Baykova E.R., Sharafullina R.R. The Impact of Coal Industry Indicators on the Economic Growth of the Russian Economy. *Coal*, 2025, i. 4, pp. 24-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-24-30
- [15] Cherepovitsyn A.E., Strelchenko K.A. Prospects for the Revitalization and Strategic Development of the Russian Mica Industry: a Focus on the Arctic. *The North and the Market: Forming the Economic Order*, 2025, i. 3, pp. 53-68. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2025.89.004
- [16] Livanova R., Pasternak S.N., Mamrukova O., Dmitrieva O., Ivanova L., Shalakov D. Economic and legal aspects of budgetary sphere formation. *Revista Juridica*, 2024, vol. 3, i. 79, pp. 652-660. DOI: 10.26668/revistajur.2316-753X.v3i79.7520
- [17] Marinina O.A., Kildiushov E.V. Geological and Economic Assessment and Comparative Analysis of Uranium ore Deposits in Russia and Iran. *International Journal of Engineering*, 2026, vol. 39, i. 10, pp. 2419-2433. DOI: 10.5829/ije.2026.39.10a.06
- [18] Ponomarenko T., Spivakov K., Romasheva N. Key Strategies and Future Prospects for Raw Material Diversification in Global Aluminum Production: A Case Study of UC RUSAL. *Mining*, 2025, vol. 5, i. 4, pp. 70. DOI: 10.3390/mining5040070
- [19] Iyushin Y.V., Boronko E.A. Analysis of Energy Sustainability and Problems of Technological Process of Primary Aluminum Production. *Energies*, 2025, vol. 18, i. 9, pp. 2194. DOI: 10.3390/en18092194
- [20] Shannak S.d., Cochrane L., Bobarykina D. Global uranium market dynamics: analysis and future implications. *International Journal of Sustainable Energy*, 2025, vol. 44, i. 1, pp. 2457376. DOI: 10.1080/14786451.2025.2457376