

Polupanova Elena Evgenievna – Kuban State University; e-mail: jienka@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79284013301; the department of computational technologies; cand. of eng. sc.; associate professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0364-1132>.

Rybalko Alexandr Andreevich – e-mail: alexmobilepost@gmail.ru; phone: +79282563456, the department of computational technologies; master's degree student.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-118-125

Е.С. Подоплелова**АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ РАНЖИРОВАНИЯ**

Данная работа посвящена отбору и сравнению популярных традиционных методов многокритериального принятия решений. В статье представляется обзор существующих работ последних лет на тему их сравнения, выделены основные критерии, а также наиболее значимые результаты. Далее, был рассмотрен пример реализации СППР (системы поддержки принятия решений) по рекомендации такого метода пользователю, который включает описание не только основных методов, но и их модификаций, выделяя исчерпывающую таксономию методов многокритериального анализа в целом. Для отбора методов в этой статье были использованы международные базы научных публикаций: Science Direct, Google Scholar и IEEE Xplore. Были произведены определенные настройки поиска для получения работ, соответствующих запросу. На следующем этапе описывается задача ранжирования альтернатив для демонстрации результатов применения выбранных методов. В качестве метода распределения весов критериев использовался метод анализа иерархий (МАИ). Результаты вычислений представлены в таблицах и графически. Метрикой оценки было принято считать устойчивость метода к количеству альтернатив и критериев, а также чувствительность к весам критериев. На текущем шаге исследования были отобраны следующие методы: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE и ELECTRE. В результате исследования были определены оптимальные методы (по соотношению вычислительной сложности к устойчивости) для их дальнейшего использования в разработке СППР, метод ELECTRE было принято использовать как дополнительный инструмент при большом количестве альтернатив для отсеивания наименее привлекательных. PROMETHEE показал высокую чувствительности к изменению весов и сложности вычислений, поэтому был исключен из дальнейших этапов разработки. VIKOR и TOPSIS показали наилучшую устойчивость при простоте вычислений.

Методы многокритериального принятия решений; система поддержки принятия решений; TOPSIS; VIKOR; Метод анализа иерархий; ELECTRE, PROMETHEE; ранжирование альтернатив.

E.S. Podoplelova**SELECTION OF MULTI-CRITERIA ANALYSIS METHODS
ON THE EXAMPLE OF THE PROBLEM OF RANKING**

This work is devoted to the selection and comparison of popular traditional methods of multi-criteria decision making. The article presents an overview of the existing works of recent years on the topic of their comparison, highlights the main criteria, as well as the most significant results. Further, an example of the implementation of a DSS (decision support system) was considered on the recommendation of such a method to the user, which includes a description of not only the main methods, but also their modifications, highlighting an exhaustive taxonomy of multi-criteria analysis methods in general. For the selection of methods in this article, international databases of scientific publications were used: Science Direct, Google Scholar and IEEE Xplore. Certain search settings have been made to retrieve jobs that match the query. The next step de-

scribes the task of ranking alternatives to demonstrate the results of applying the selected methods. As a method for distributing the weights of the criteria, the method of analysis of hierarchies (AHP) was used. The calculation results are presented in tables and graphically. The evaluation metric was considered to be the stability of the method to the number of alternatives and criteria, as well as sensitivity to the weights of the criteria. At the current stage of the study, the following methods were selected: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE and ELECTRE. As a result of the study, optimal methods were determined (in terms of the ratio of computational complexity to stability) for their further use in the development of DSS, the ELECTRE method was used as an additional tool with a large number of alternatives to screen out the least attractive ones. PROMETHEE showed high sensitivity to changes in weights and complexity of calculations, therefore it was excluded from further development stages. VIKOR and TOPSIS showed the best stability with the simplicity of calculations.

Methods of multi-criteria decision making; decision support system; TOPSIS; VIKOR; Hierarchy analysis method; ELECTRE; PROMETHEE; ranking of alternatives.

Введение. Принятие решений является неотъемлемой частью как естественного, так и искусственного интеллекта. Вопрос о том, что именно считать искусственным интеллектом стоит остро до сих пор. Однако, в любом случае невозможно представить это понятие без процесса принятия решений. На каждом этапе анализа должно приниматься какое-либо решение. Например, в теории игр это решение о следующем шаге, в компьютерном зрении нужно принять решение и ответить на вопрос об изображении на картинке. В рамках сложных экономических процессов от принятия верного решения или выбора наилучшей альтернативы зависит дальнейшее развитие. В реальной жизни принятие решений всегда осуществляется в динамической, быстроизменяющейся среде, включающей множество факторов. Для этого были разработаны методы многокритериального принятия решений, которые используются, чаще всего, в рамках задач выбора, сортировки или ранжирования альтернатив, имеющихся у ЛПР.

Для начала, предлагается рассмотреть работы авторов, связанные с тематикой данного исследования. В работах [1, 2] представлена разработка таксономии для СППР по рекомендации метода MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) для ЛПР. Авторы представили новую методологию выбора методов анализа решений по множеству критериев (MCDA). Он реализован в программном обеспечении для выбора метода анализа решений по множеству критериев (MCDA-MSS), системе поддержки принятия решений, которая помогает лицу, принимающему решения, выбрать наиболее подходящий метод MCDM для использования для данной проблемы принятия решений (DMP). Система предоставляет рекомендации по управлению принятием решений и выбору из коллекции из более чем 200 методов MCDA. Они оцениваются в соответствии с разработанной в работе [1] таксономией, включающей 24 основных критерия.

Отбор методов MCDM. Отбор методов и их количества обусловлен анализом литературы, а также количеством публикаций по данным методам в период с 2018 по 2023 годы. Для подсчета я взяла три источника: Science Direct [3], Google Scholar [4], IEEE Xplore [5]. Результаты приведены на графике. Для удобства результаты Google Scholar на графике (уменьшены в 10 раз, т.к. мы сравниваем не количество результатов в источниках, а популярность метода относительно других. В качестве параметров отбора в Science Direct были подсчитаны только исследовательские статьи, не включающие обзор (Review). В остальных случаях параметры ограничены только годом публикации.

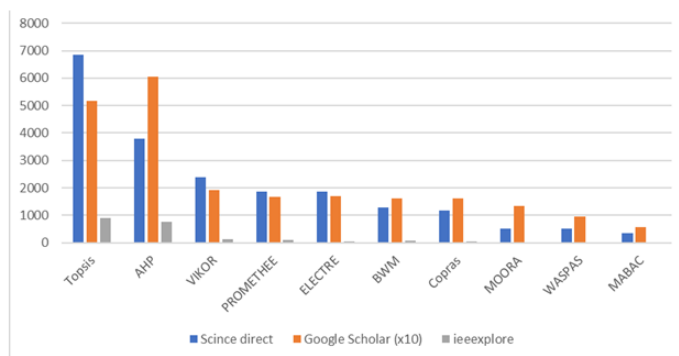


Рис. 1. Результаты запроса

Как можно заметить из графика, явно выделяются TOPSIS [6, 7] and AHP [8], следом идут VIKOR [9], PROMETHEE [10–12] (без разграничений по версиям), ELECTRE [13], BWM [14] and COPRAS [15] имеют практически одинаковый результат, MOORA [16], WASPAS [17] and MABAC [18] имеют самый низкий рейтинг. Обзору и сравнению этих методов посвящены работы [19–21]. В рамках данной статьи было проведено сравнение нескольких методов из вышеописанных.

Описание задачи. Задача ранжирования заключалась в выборе автомобиля по нескольким критериям. Список альтернатив представлен как A1, A2, A3, A4, A5, A6. В качестве критериев определены:

C1 – цена авто, C2 – количество лошадиных сил, C3 – состояние кузова по 5-балльной шкале, C4 – пробег, C5 – наличие кондиционера, C6 – обивка салона (1 – кожа, 0 – велюр).

Также, на каждом этапе добавления критериев пересчитывались их веса. В табл. 1 представлен пример матрицы решений для 3 альтернатив и 4 критериев. C1 и C4 – минимизируются.

Таблица 1

Пример исходной задачи 3х альтернатив по 4-м критериям

	-	+	+	-
	C1	C2	C3	C4
A1	15000	118	5	90000
A2	25000	180	4	150000
A3	19000	200	3	185000

Результаты на всех примерах представлена в табл. 2-5.

Таблица 2

Результаты 3-х альтернатив по 4-м критериям

	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q(k=1)	Rank
A1	0.79	1	1	0	1	0.6337	1	0,93172	1
A2	0.26	3	3	1	3	-0.465	3	0,66477	3
A3	0.43	2	2	0,5478	2	-0.168	2	0,7111	2

Первый эксперимент показал одинаковый результат всеми методами.

Таблица 3

Результаты 5-ти альтернатив по 5-ти критериям

5x5									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0.41	5	-	0,2083	2	0,1327	2	0,2862	5
A2	0.53	3	2	0,9709	5	-0,3571	5	0,6589	3
A3	0.64	1	1	0,0559	1	0,0561	3	0,7000	2
A4	0.47	4	-	0,7083	4	0,1888	1	0,3248	4
A5	0.58	2	1	0,4860	3	-0,0204	4	0,7015	1

В табл. 3 были рассмотрены 5 критериев и 5 альтернатив. В результате TOPSIS and WASPAS одинаковый ранги присвоили A1, A2, A4, определив наихудшей альтернативой A1. VIKOR and PROMETHEE наихудшими определили A2, A1 присвоен ранг 2, тогда как в других методах она выбрана наихудшей. ELECTRE при таком наборе отбросил A1 и A4 как наименее привлекательные, а остальные сравнил, приравняв между собой A3 и A3 как наилучшие.

В табл. 4 представлен результат ранжирования 3-х альтернатив по 6 критериям. VIKOR and PROMETHEE дали одинаковый результат, ELECTRE исключил A1, остальные полностью отличаются между собой.

Таблица 4

Результаты 3-х альтернатив по 6-м критериям

3x6									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0,4	1	-	0,37	2	0,11	2	0,3422	3
A2	0,62	2	2	1	3	-0,235	3	0,7741	1
A3	0,75	3	1	0	1	0,125	1	0,4020	2

Таблица 5

Результаты 6-ти альтернатив по 3-м критериям

6x3									
	TOPSIS		ELECTRE	VIKOR		PROMETHEE		WASPAS	
	Score	Rank		index (Q)	Rank	Phi	Rank	Q	Rank
A1	0,58	2	2	0,7277	4	0,16	2	0,7212	3
A2	0,4	6	5	1	6	-0,36	6	0,6584	6
A3	0,49	4	3	0,3032	1	-0,04	3	0,6829	5
A4	0,58	2	4	0,7860	5	-0,08	4	0,7451	2
A5	0,46	5	3	0,6893	3	-0,08	4	0,6886	4
A6	0,6	1	1	0,3274	2	0,4	1	0,7898	1

В табл. 5 рассмотрены 6 альтернатив по 3 критериям. Здесь результаты получились более согласованными. Все, кроме VIKOR определили лучшей альтернативу A6, он присвоил ей ранг 2. Наихудшей оказалась единогласно альтернатива A2. TOPSIS присвоил одинаковые ранги A1 и A4. Для более наглядного представления были составлены графики для последних трех таблиц, т.к. первый эксперимент дал одинаковые результаты, представленные на графиках (рис. 3-6.)

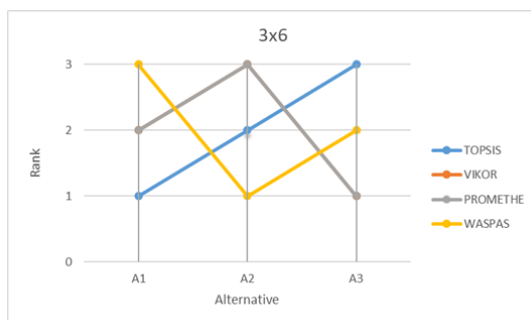


Рис. 2. График матрицы 3x6

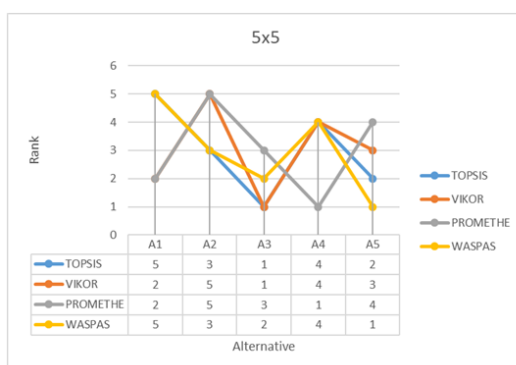


Рис. 3. График матрицы 5x5

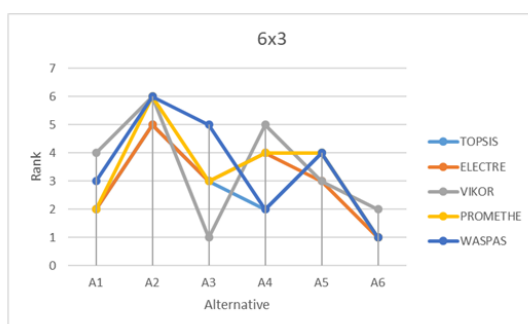


Рис. 4. График матрицы 6x3

Первый график показывает абсолютно разные результаты. Второй показывает больше схожести, например, A4 присвоен ранг 4 всеми методами, кроме PROMETHEE.

На результаты существенно повлияло следующее:

- ◆ распределение весов критериев;
- ◆ соотношение количества альтернатив и критериев.

Распределение весов. Для распределения весов критериев предлагается использовать метод МАИ(метод анализа иерархий). Это обосновано его невысокой вычислительной сложностью в соотношении с качественным результатом. Также, сравнение критериев относительно друг друга упростит их ранжирование для ЛПР. Для вышеописанных экспериментов веса были распределены в табл. 6.

Таблица 6

Распределение весов критериев для эксперимента

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
3x4	0,47	0,16	0,1	0,28	-	-
5x5	0,4	0,1	0,06	0,16	0,26	-
3x6	0,38	0,16	0,1	0,07	0,25	0,04
6x3	0,35	0,35	0,3	-	-	-

Оценка результатов. Помимо вышеописанного сравнения, я решила оценить методы с точки зрения чувствительности результатов к изменению весов. Ввиду небольшого набора альтернатив и критериев были подвергнуты изменениям только матрицы 5x5 и 6x3. Вместо исходных весов, рассчитанных МАИ из таблицы 6, были подставлены равные веса: в первом варианте по $w = 0,33$ (3 критерия), во втором по $w = 0,2$ (5 критериев). В табл. 7 представлены результаты изменения порядка ранжирования при равных весах от наиболее привлекательной к наименее.

Таблица 7

Анализ чувствительности

	TOPSIS		VIKOR		WASPAS $l=0,6$		PROMETHEE	
	Исходные	Равные	Исходные	Равные	Исходные	Равные	Исходные	Равные
6x3	641352	146532	365142	365142	613452	614352	613452	635214
5x5	35241	52314	31542	51234	53241	51234	41352	15432

Стоит отметить, что в первом эксперименте всего 3 критерия на 6 альтернатив, потому приравнивание весов между собой было несущественным – $\Delta w_{\max} = 0,05$. При этом, результат остался тем же только при расчете методом VIKOR. Остальные совпадения в рангах выделены цветом. Если рассмотреть по тройкам, то TOPSIS поменял местами альтернативы в их рамках, то есть первые и последние тройки определены так же. WASPAS также, практически не изменен, только 3 и 4 альтернативы поменялись местами.

Изменение весов на 5 критериях показало значительный отклик. TOPSIS, как и в первом случае, изменил первую тройку и последние две альтернативы местами, VIKOR поставил 5ю альтернативу с 3его на 1е место, а наихудшей определил 4ю. WASPAS показал наименьшие колебания, однако 1 альтернатива из наихудшей стала второй по привлекательности. PROMETHEE не изменил наихудшую альтернативу.

Заключение. В этой статье я рассмотрела методы принятия решений многокритериальных задач: TOPSIS, WASPAS, VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE. Подробно был рассмотрен отбор и сравнение методов MCDM на экспериментах с разным количеством альтернатив и критериев. Также, для более глубокого анализа методов они были протестированы на устойчивость к изменению весов. В итоге были сделаны следующие выводы:

- а) на результат ранжирования существенно влияет распределение веса критериев;
- б) метод ELECTRE целесообразно использовать в случае, когда имеется большое количество альтернатив, чтобы отсеять неконкурентоспособные. Для ранжирования оставшихся нужно применять дополнительные методы MCDA;
- в) при большом количестве критериев и маленьком количестве альтернатив результат по разным методам абсолютно несогласован;

Анализ чувствительности позволил сделать итоговый вывод: использование метода МАИ для распределения весов позволяет получить более точное ранжирование с учетом предпочтений ЛПР, PROMETHEE и ELECTRE будет исключен из дальнейших исследований по нескольким причинам: сложность вычислений несопоставима с результатами, а ELECTRE будет использован только в случае большого количества альтернатив, на меньших его результаты неудовлетворительны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Slowinski R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system, *European Journal of Operational Research*, 2022, 302, pp. 633-651. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.011> 8 2 (accessed 15 April 2023).
2. Cinelli M., Kadziński M., Gonzalez M., Slowinski R. How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy, *Omega*, 2020, 96, 102261. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261> (accessed 17 April 2023).
3. Science Direct. Available at: <https://www.sciencedirect.com/> (accessed 17 April 2023).
4. Google Scholar. Available at: <https://scholar.google.com/> (accessed 17 April 2023).
5. IEEE Xplore. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (accessed 17 April 2023).
6. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag, 1981.
7. Yoon K. A reconciliation among discrete compromise situations, *Journal of the Operational Research Society*, 1987, 38 (3), pp. 277-286.
8. Forman Ernest H., Saul I. Gass. The analytical hierarchy process an exposition, *Operations Research*, 2001, July (Vol. 49, No. 4), pp. 469-487. DOI: 10.1287/opre.49.4.469.1123.
9. Opricovic S., Gwo-Hshiung Tzeng. Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 178, No. 2, pp. 514-529.
10. Brans J., Mareschal B. PROMETHEE methods, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 2005. pp. 163-196.
11. Macharis C., Brans J., Mareschal B. The GDSS PROMETHEE procedure, *Journal of Decision Systems*, 1998, Vol. 7. No. 4, pp. 283-307.
12. Brans J.P., Mareschal B., Vincke Ph. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis, *Operational Research*, 1984, 84, pp. 477-490.
13. Roy B. The outranking approach and the foundation of ELECTRE methods, *Theory and Decision*, 1991. No. 31, pp. 49-73.
14. Rezaei J. A Concentration Ratio for Non-Linear Best Worst Method, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2020, 19 (3), pp. 891-907.
15. Alinezhad A., Khalili J. COPRAS Method. In: New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM), *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, Cham, 2019, Vol. 277. DOI: 10.1007/978-3-030-15009-9_12.
16. Brauers W.K.M., Karel W., Zavadskas E., Kazimieras E. Robustness of the multi-objective MOORA method with a test for the facilities sector, *Technological and economic development of economy*, 2009, No. 2 (15), pp. 352-375.
17. Alinezhad A., Khalili J. WASPAS Method. In: New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM), *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, Cham, 2019, Vol. 277. DOI: 10.1007/978-3-030-15009-9_13.
18. Pamucar D., Cirovic G. The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive border approximation area comparison (MABAC), *Expert Systems with Applications*, 2015, 42 (6), pp. 3016-3028. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.057.

19. Daugavietis J.E., Soloha R., Dace E., Ziemele J.A. Comparison of Multi-Criteria Decision Analysis Methods for Sustainability Assessment of District Heating Systems, *Energies*, 2022, 15, 2411.
20. Kizielewicz B., Bączkiewicz A. Comparison of Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, Fuzzy WASPAS and Fuzzy MMOORA methods in the housing selection problem, *Procedia Computer Science*, 2021, 192, pp. 4578-91.
21. Salabun W., Wątróbski J., Shekhovtsov A. Are MCDA Methods Benchmarkable? A Comparative Study of TOPSIS, VIKOR, COPRAS, and PROMETHEE II Methods, *Symmetry*, 2020, 12, pp. 1549.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Подоплелова Елизавета Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: chuzhinova@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525844188; аспирант.

Podoplelova Elizaveta Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: chuzhinova@sfnu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525844188; postgraduate student.

УДК 519.254

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-125-134

М.Ю. Георги

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЧИННОСТИ ИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРАКТИКЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Обсуждается значимость извлечения причинно-следственных связей в машинном обучении для принятия решений и оценки воздействия на реальный мир. Отмечается, что большинство текущих успехов в машинном обучении основаны на огрубленном распознавании образов и корреляционном анализе, но для более сложных задач необходимо извлекать причинно-следственные связи. Декларируется что проблемы объяснимости прогнозов и причинно-следственного понимания, даже с применением передовых методик машинного обучения LIME, SHAP, TreeSHAP, DeepSHAP, Shapley Flow, являются фундаментальными препятствиями в развитии искусственного интеллекта. В статье кратко раскрываются основные философские математические концепции и определения причинности, включая понятия контрфактуалов, байесовских сетей, направленных ациклических графов и причинно-следственного формального вывода. Делается вывод о том, что практическая значимость базирующегося на данных причинно-следственного анализа, состоит в ответах на априори сформулированные вопросы, которые могут отражать гипотетическую связь между событием (причиной) и вторым событием (следствием), где второе событие является прямым следствием первого. Далее производится сравнительный анализ способов и основных сценариев использования фреймворков Causal Discovery и Causal Inference, на базе которых возникает возможность сделать предположения о расположенной в основе исследуемого набора данных причинно-следственной структуре и задействовать статистические методы для оценки силы и направления таких связей. В статье также обсуждаются методы и алгоритмы причинно-следственного анализа и их применение в реальных задачах. Упомянуты репрезентативные методы, такие как модели на основе ограничений, модели на основе оценок и функциональные каузальные модели, тесты (условные) на независимость, оценочные функции, всё то что может быть задействовано для решения проблемы извлечения причинно-следственных связей из наблюдательных данных, большинство которых реализовано в open-source фреймворки, таких как Microsoft DoWhy, Uber CausalML, causal-learn, Econ-ml и многие другие, которые реализуют большинство упомянутых методов причинно-следственного анализа.

Причинно-следственный ИИ; Объективность ИИ; скоростное обучение; прогноз под вмешательством.