

Системы поддержки принятия проектных решений технологических платформ горнотехнических систем с использованием численных методов и многокритериальной оптимизации

О.Ю. Козлова¹✉, В.В. Агафонов², А.С. Оганесян², В.В. Козлов³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

³ Московский политехнический университет (Тучковский филиал), п.г.т. Тучково, Российская Федерация

✉ kozlova_ou@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрены теоретические и практические составляющие принятия проектных решений с использованием экспертных моделей и технологий с использованием продукционных правил и компромиссной стратегии рейтингования альтернативных вариантов как основных инструментов экспериментального моделирования и обеспечения целевой стратегии проектирования угледобывающего предприятия. Формализованы основные составляющие методологии системной динамики для моделирования и анализа полученных данных. В рамках выбора технологических платформ угледобычи предлагается методологический подход, основанный на системах поддержки принятия проектных решений с использованием численных методов и многокритериальной оптимизации процедуры принятия решений – АНР (Analytic Hierarchy Process, метод анализа иерархий).

Проведено исследование по выбору системы разработки выемочных полей при отработке запасов Элегестского каменноугольного месторождения, заложенной в основу технологической платформы извлечения полезного ископаемого. К первоочередной отработке принят пласт 2.2 Улуг, имеющий среднюю мощность 7,9–8,0 м с углом падения 3–26°. В качестве численных методов использовались методические подходы Nicholas и UBC. Усредненные результаты оптимизации (средние значения рангов) получены с помощью методов принятия решений – ELECTRE I, PROMETHEE II, АНР и АНР-PROMETHEE. Проведенное исследование показало, что в условиях отработки запасов Элегестского каменноугольного месторождения наиболее предпочтительной является технологическая структура с использованием системы разработки с выпуском подкровельной толщи.

Ключевые слова: угледобывающее предприятие, система поддержки принятия решений, экспертные модели, численные методы, многокритериальная оптимизация, технологическая платформа, функции предпочтения

Для цитирования: Козлова О.Ю., Агафонов В.В., Оганесян А.С., Козлов В.В. Системы поддержки принятия проектных решений технологических платформ горнотехнических систем с использованием численных методов и многокритериальной оптимизации. *Горная промышленность*. 2026;(4):54–58. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-54-58>

Support systems for making design decisions for technological platforms of mining systems using numerical methods and multi-criteria optimization

O.Y. Kozlova¹✉, V.V. Agafonov², A.S. Oganessian², V.V. Kozlov³

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

² National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

³ Moscow Polytechnic University (Tuchkovsky Branch), Tuchkovo, Russian Federation

✉ kozlova_ou@mail.ru

Abstract: The article discusses theoretical and practical aspects of making design decisions using expert models and technologies that rely on production rules and a compromise strategy of rating alternative options as the main tools of experimental modeling and providing a target strategy for designing a coal mining operation. The main components of the system dynamics methodology are formalized for modeling and analyzing of the obtained data. A methodological approach is proposed for selection of the coal mining technological platforms, which is based on the support systems for design decisions using numerical methods and multi-criteria optimization of the decision-making procedure, i.e. the Analytic Hierarchy Process (AHP).

The authors made a research on selecting a mining method for mining method mine sections of the Elegest coal deposit, which forms the basis of the technological platform for the deposit development. Coal seam No. 2.2 Ulug, with the average thickness of

7.9–8.0 m and the dip angle of 3–26°, was selected for priority mining. The Nicholas and UBC methodological approaches were used as the numerical methods. The averaged optimization results (the average rank values) were obtained using the ELECTRE I, PROMETHEE II, AHP, and AHP-PROMETHEE decision-making methods. The study showed that, the most preferable technological solution for the mining conditions of the Elegest coal deposit is the one that utilizes sublevel caving.

Keywords: coal mining company, decision support system, expert models, numerical methods, multi-criteria optimization, technological platform, preference functions

For citation: Kozlova O.Y., Agafonov V.V., Oganessian A.S., Kozlov V.V. Support systems for making design decisions for technological platforms of mining systems using numerical methods and multi-criteria optimization. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):54–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-54-58>

Введение

Выбор рациональной технологической платформы угледобычи в рамках конкретного месторождения представляется довольно сложной проблемой, поскольку является многокомпонентной составляющей с многочисленными динамическими связями и ограничениями, и, что самое главное, он должен в конечном итоге приводить к минимизации первоначальных капитальных инвестиций и последующих эксплуатационных затрат [1–4]. Сопутствующими ограничениями являются соответствующий уровень промышленно-экологической безопасности и производительности труда промышленно-производственного персонала.

Учитывая мнение ведущих аналитиков в области проектной деятельности, можно констатировать, что определяющими ограничениями при выборе являются ряд природных и макроэкономических факторов, которые можно сгруппировать в три основных класса:

1. Класс горно-геологических факторов, к которым можно отнести мощность и угол падения угольного пласта, глубину разработки, стратиграфию и литологию месторождения, тектонику, физико-механические свойства полезного ископаемого и вмещающих пород и т.д.

2. Класс горнотехнических факторов, к которым можно отнести устойчивость вмещающих пород, нагрузку на очистной забой и производственную мощность, коэффициент извлечения, показатели работы основного и вспомогательного горнодобывающего оборудования и т.д.

3. Класс макроэкономических факторов, к которым можно отнести: капитальные затраты, эксплуатационные затраты, операционную рентабельность, чистый дисконтированный доход, индекс доходности, дисконтированный срок освоения капитальных вложений и пр.

Исходя из этого выбор технологической платформы отработки угольных запасов рекомендуется проводить в увязке с горно-геологическими и горнотехническими условиями эксплуатации с последующей реализацией технико-экономических расчетов и оценки альтернативных вариантов. В этих условиях наиболее рациональным является методологический подход, основанный на системах поддержки принятия проектных решений технологических платформ угледобычи с использованием численных методов и многокритериальных методов принятия решений – метод анализа иерархий (AHP, Analytic Hierarchy Process) [5–7]. Как правило, после его частичной реализации остаются три-четыре варианта, из которых на последней стадии с использованием продукционных правил и компромиссной стратегии рейтингования выбирают оптимальный.

Результаты

В качестве объекта исследований использовано Элегестское каменноугольное месторождение. К первоочередной отработке принят пласт 2.2 Улуг, имеющий среднюю мощность 7,9–8,0 м с углом падения 3–26°.

Варианты выбора систем разработки выемочных полей при отработке запасов Элегестского каменноугольного месторождения, заложенные в основу технологической платформы извлечения полезного ископаемого, в силу специфических горно-геологических и горнотехнических условий залегания угольного пласта рассматривались с учетом мирового опыта угледобычи в аналогичных или близких условиях. При этом рассмотрено все количество возможных альтернативных вариантов технологических схем и выделены три, принятые для оптимизации (рис. 1).

В рамках предварительного выбора технологической структуры с использованием численных методов используются методические подходы Nicholas и UBC [8–11]. Рейтингование вариантов с использованием алгоритмического наполнения этих подходов представлено в табл. 1.

Есть разночтения в использовании систем разработки с выемкой угольного пласта в один слой и слоевой, но по отношению к системе разработки с выпуском подкровельной толщи они отсутствуют, что говорит о приоритете ее использования.

В рамках окончательного выбора технологической структуры с использованием численных методов используются методические подходы систем поддержки принятия проектных решений ELECTRE, PROMETHEE, AHP и интегрированный метод AHP–PROMETHEE [12; 13]. Весовые коэффициенты критериев оптимальности определялись экспертным путем с использованием процедуры «ДЕЛФИ». В табл. 2 заданы направления оптимизации критерия (max или min). Необходимые преобразования в рамках использования и адаптации к решению поставленной задачи вы-

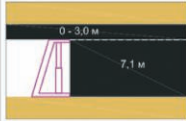
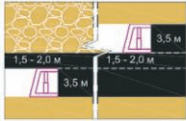
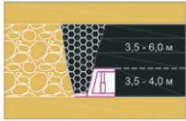
Наименование параметров, включающих возможность применения рассматриваемой системы разработки в условиях ГОК "Элегест"	Наименование системы разработки		
	В одну заходку	Слоевая	С выпуском
			
Возможность работать на углах более 10°	–	+	+
Возможность добывать одним забоем не менее 6 млн т/год	+	–	+

Рис. 1
Возможные альтернативные варианты технологических схем

Fig. 1
Possible alternatives for the mining methods

Таблица 1
Ранжирование альтернативных вариантов технологических структур с использованием системы разработки

Вариант технологической структуры	Методология	
	Nicholas	UBC
С выемкой в один слой	3	2
Слоевая	2	3
С выпуском подкровельной толщи	1	1

Таблица 2
Критерии оптимальности

Критерии	Обозначение	Весовые коэффициенты	Направление оптимизации	Категория
Эксплуатационные издержки	K_1	0,1985	min	Количественная
Энергоемкость добычи	K_2	0,1400	min	Количественная
Чистый дисконтированный доход	K_3	0,2255	max	Количественная
Коэффициент извлечения запасов	K_4	0,1200	max	Количественная
Дисконтированный срок освоения капитальных вложений	K_5	0,1055	min	Количественная
Оптовая цена одной тонны	K_6	0,1850	max	Количественная
Промышленно-экологическая безопасность	K_7	0,0955	max	Качественная
Степень конкурентоспособности	K_8	0,0645	max	Качественная

Таблица 3
Последовательность рейтингования альтернатив в рамках методологии ELECTRE I

Альтернативы	Предпочтения	Итог	Рейтинг
A_1	A_3, A_2	2	3
A_2	A_3, A_1	2	2
A_3	A_2, A_1	2	1

Таблица 5
Результаты сравнения критериев оптимальности

Критерии	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
Вес	0,2877	0,1756	0,3276	0,1356	0,1099	0,2587	0,0499	0,0167
Рейтинг	2	4	1	5	6	3	7	8
$\lambda_{\max} = 8,1002$	$CI = 0,1076$			$RI = 1,39$		$CR = 0,071 < 0,1$		

полнялись с использованием линейных, интервальных и биполярной шкал. Решение поставленной задачи в рамках методологии ELECTRE I дало возможность сформировать последовательность рейтингования альтернатив (табл. 3).

В рамках уточнения результатов оптимизации были задействованы методы PROMETHEE, АНР и гибридный метод АНР-PROMETHEE с использованием шести общепринятых обобщенных критериев оптимальности с функциями предпочтений (рис. 2) [14], что дало возможность сформировать уточненную последовательность рейтингования альтернатив (табл. 4).

Модельное представление АНР включает следующее алгоритмическое наполнение: итерация 1 – иерархическое структурирование модели технологической структуры;

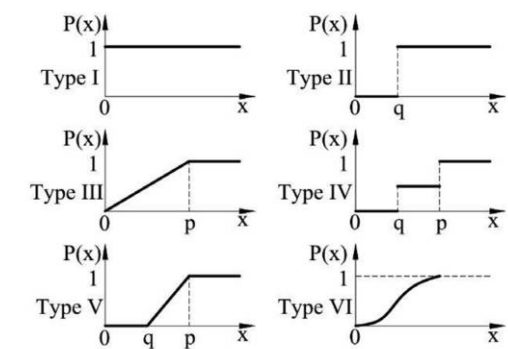


Рис. 2
Виды функций предпочтения в рамках использования обобщенных критериев оптимальности в PROMETHEE

Table 2
Criteria of optimality

Таблица 4
Последовательность рейтингования альтернатив в рамках методологии PROMETHEE II

Альтернативы	Положительный поток	Отрицательный поток	Чистый поток	Рейтинг
A_3	0,3750	0,1775	0,1975	1
A_2	0,1123	0,3567	-0,2444	3
A_1	0,2098	0,2032	0,0066	2

Table 5
Results of comparing the criteria of optimality

итерация 2 – попарное сравнение критериев оптимальности; итерация 3 – формирование матрицы оценок; итерация 4 – нормализация матрицы оценок и формирование последовательности рейтингования альтернатив [5; 6]. Рассчитанные коэффициенты согласованности матрицы парных сравнений укладываются в рамки доверительных интервалов и могут быть использованы в системе поддержки принятия проектных решений (табл. 5). Модельное представление гибридного метода АНР-PROMETHEE дополнено рядом объединенных продукционных правил, касающихся весовых коэффициентов и функций предпочтений [7; 15]. Окончательные последовательности рейтингования альтернатив по методу АНР и гибридного метода АНР-PROMETHEE представлены в табл. 6, 7.

Таблица 6
Последовательность
рейтингования
альтернатив по методу
АНР

Альтернативы	Оценка	Рейтинг
A ₁	0,1384	3
A ₂	0,1876	2
A ₃	0,4398	1

Table 6
Sequence for ranking
alternatives using the
АНР method

Таблица 7
Последовательность рейтингования
альтернатив по методу АНР-
PROMETHEE

Альтернативы	Положительный поток	Отрицательный поток	Чистый поток	Рейтинг
A ₁	0,2743	0,1378	0,1365	2
A ₂	0,1133	0,1008	0,0125	3
A ₃	0,3876	0,1965	0,1911	1

Table 7
Sequence for ranking alternatives
using the АНР-PROMETHEE method

Таблица 8
Сравнение усредненных результатов оптимизации (средние
значение рангов)

Альтернативы	ELECTRE I	PROMETHEE II	АНР	АНР-PROMETHEE	Среднее	Рейтинг
A ₃	1	1	1	1	1,00	1,00
A ₂	2	3	2	3	2,50	0,40
A ₁	3	2	3	2	2,50	0,40

Table 8
Comparison of the averaged optimization results (the average
rank values)

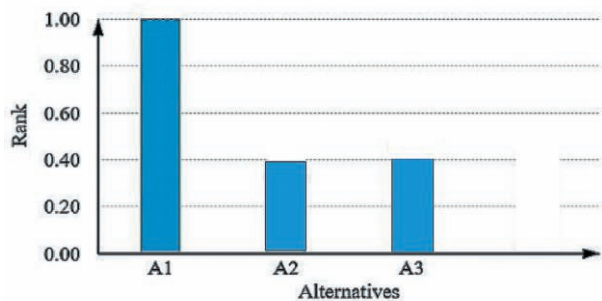


Рис. 3
Гистограмма распределения
альтернатив: А₁ – технологическая
структура с системой разработки
с выпуском подкровельной толщи;
А₂ – технологическая структура с
системой разработки с отработкой
в один слой; А₃ – технологическая
структура со слоевой системой
разработки

Fig. 3
A bar chart of the
alternative distribution:
A₁ – technological structure
with sublevel caving,
A₂ – technological structure
with single seam mining,
A₃ – technological structure
with the slicing system

Сравнение усредненных результатов оптимизации (средние значения рангов), полученных с помощью многокритериальных методов принятия решений ELECTRE I, PROMETHEE II, АНР и АНР-PROMETHEE, указывает в явном виде на предпочтительность использования в условиях отработки запасов Элегестского каменноугольного месторождения технологической структуры с использованием системы разработки с выпуском подкровельной толщи (табл. 8, рис. 3).

Заклучение

В современных условиях недропользования выбор технологической платформы угледобычи сопряжен с учетом многих разнообразных по природе и сущности горно-геологических, горнотехнических и экономических факторов. С учетом этого резко повышается цена принятия ошибочных или нерациональных проектных решений в области извлечения запасов полезных ископаемых, которые, как правило, характеризуются большой капиталом- и материалоемкостью. Это подтверждается довольно частыми примерами сложившейся практики в области неоднократной корректировки проектных решений на угольных шахтах,

которые не обладали приемлемой степенью адаптации и гибкости, соответствующей степени изменчивости исходных условий эксплуатации.

Все более возрастающие требования к качеству проектной деятельности в сфере недропользования диктуют необходимость реализации в необходимом объеме специальных видов аналитической работы, в основу которой должны быть заложены специальные знания о существующих методах, механизмах и средствах поддержки принятия решений с учетом их комплексности и системности. При этом задачи принятия решений, как правило, отождествляются и интерпретируются как задачи выбора.

Учитывая возможные риски и неопределенность последствий в заявленной области исследований, следует ориентироваться на использование численных методов и многокритериальной оптимизации с вводом в процессы проектной деятельности составляющих системного анализа, статистических решений, исследования операций, теории оптимального управления, теории игр, когнитивного моделирования, информатики, искусственного интеллекта и пр., которые заложены в основу алгоритмического обеспечения многокритериальных моделей принятия решений: ELECTRE I, PROMETHEE II, АНР и АНР-PROMETHEE.

Список литературы / References

1. Фролов А.С., Охрименко Е.А., Агафонов В.В., Охотников В.Е. Развитие методологии систем поддержки принятия проектных решений в области промышленного извлечения метановых ресурсов. М.: Горная книга; 2023. 20 с.

2. Балашова И.В. Анализ проблем принятия решений в задачах управления проектами. *Вестник Российской экономической университета имени Г. В. Плеханова*. 2022;(2):74–81. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-2-74-81>
Balashova I.V. Analyzing Problems of Decision-Making in Project Management. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2022;(2):74–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2022-2-74-81>

3. Балашова И.В., Терещенко Т.А. Системы поддержки принятия решений. *The Scientific Heritage*. 2021;(79-4):3–7. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7>
Balashova I.V., Tereshchenko T.A. Decision support systems. *The Scientific Heritage*. 2021;(79-4):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7>

4. Курейчик В.М. Особенности построения систем поддержки принятия решений. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012;(7):92–98.
Kureichik V.M. Features of decision making support system design. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2012;(7):92–98. (In Russ.)
5. Хорольский А.А., Гринев В.Г. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых. *Геология и охрана недр*. 2018;(3):68–74. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31097.72809>
Khorolskiy A.A., Grinev V.G. Selection of scenario for the development of mineral deposits. *Geology and Bowels of the Earth*. 2018;(3):68–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31097.72809>
6. Цибизова Т.Ю., Карпунин А.А. Применение метода анализа иерархий в оценке качества процессов управления. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(2-1):200. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=20847> (дата обращения: 15.03.2026).
Tsibizova T.Yu., Karpunin A.A. Method of hierarchies' analysis for quality assessment of managerial processes. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(2-1):200. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/article/view?id=20847> (accessed: 15.03.2026).
7. Фурцев Д.Г., Коваленко А.Н., Ткаченко Е.А. Об Оптимизации на основе метода анализа иерархий. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика*. 2014;(1):142–149.
Furtsev D.G., Kovalenko A.N., Tkachenko E.A. On the optimization method based on the analytic hierarchy process. *Belgorod State University Scientific Bulletin. History, Political Science, Economics, Information Technologies*. 2014;(1):142–149. (In Russ.)
8. Miller T.L., Pakalnis R., Poulin R. UBC mining method selection. In: Singhal R.K., Mehrotra A.K., Hadjigeorgiou J., Poulin R. (eds) *Mine planning and equipment selection 1995: proceedings of the fourth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 31 October – 3 November, 1995*. Rotterdam: A.A. Balkema; 1995, pp. 163–168.
9. Nicholas D.E. Method selection – A numerical approach. In: Stewart D. (ed.) *Design and operation of caving and sublevel stoping mines*. New York: SME-AIME; 1981. Chapter 4, pp. 39–53.
10. Nicholas D.E. Selection method. In: Hartman H.L. (ed.) *SME mining engineering handbook*. 2nd ed. Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration Inc.; 1992, pp. 2090–2106.
11. Shahriar K., Oraee K., Bakhtavar E. A study on the optimization algorithms for determining open-pit and underground mining limits. In: *Conference Proceedings 7th International Scientific Conference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2007), Albena, Bulgaria, June 11–15, 2007*. Sofia: International Multidisciplinary Scientific GeoConferences; 2007, pp. 246–253. <http://hdl.handle.net/1893/3083>
12. Mardani A., Jusoh A., MD Nor K., Khalifah Z., Zakwan N., Valipour A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2015;28(1):516–571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
13. Sitorus F., Cilliers J.J., Brito-Parada P.R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. *Expert Systems with Applications*. 2019;121:393–417. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.001>
14. Brans J.P., Vincke P.H., Mareschal B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*. 1986;24(2):228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
15. Шинкаренко В.И., Васецкая Т.Н. Моделирование процесса ранжирования альтернатив методом анализа иерархий средствами конструкционно-продукционных структур. *Математические машины и системы*. 2016;(1):39–47.
Shinkarenko V.I., Vasetska T.M. Simulation the process of ranking of alternatives of hierarchies analysis method by means of constructive and productive structures. *Mathematical Machines and Systems*. 2016;(1):39–47. (In Russ.)

Информация об авторах

Козлова Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики-3, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kozlova_ou@mail.ru

Агафонов Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры геотехнологий освоения недр Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: agafonovvv@yandex.ru

Оганесян Армине Сейрановна – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного проектирования и дизайна, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: oganesyan.as@misis.ru

Козлов Валерий Владимирович – доктор технических наук, доцент, Московский политехнический университет (Тучковский филиал), п.г.т. Тучково, Российская Федерация; e-mail: kozmaster@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.03.2026

Поступила после рецензирования: 12.05.2026

Принята к публикации: 10.06.2026

Information about the authors

Olga Yu. Kozlova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics-3, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; e-mail: kozlova_ou@mail.ru

Valery V. Agafonov – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Geotechnologies for Subsurface Development, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: agafonovvv@yandex.ru

Armine S. Oganessian – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automated Design and Design, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: oganesyan.as@misis.ru

Valery V. Kozlov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Moscow Polytechnic University (Tuchkovsky Branch), Tuchkovo, Russian Federation; e-mail: kozmaster@mail.ru

Article info

Received: 12.03.2026

Revised: 12.05.2026

Accepted: 10.06.2026