

УДК 622.013

**ВЫБОР МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОГО ШАХТНОГО СТВОЛА  
С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИМОДЕЛЬНОГО АНАЛИЗА**

**М. Худей<sup>1</sup>, С. Вуйич<sup>2</sup>, М. Радосавлевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Горно-строительное предприятие “Велень”,  
E-mail: marjan.hudej@rlv.si, Республика Словения*

<sup>2</sup>*Белградский университет,  
E-mail: slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs,  
Студентски трг, 1, 11000, Белград, Республика Сербия*

На примере выбора местоположения шахтного ствола шахты “Велень” описывается подход к решению проблемы, суть которого состоит не в выборе наиболее подходящего метода для обоснования принятия решения, а в применении мультимодельного способа, когда одновременно используется несколько многокритериальных методов. В случае, когда примененные методы не дают одинаковые последовательности альтернатив, предлагается формировать окончательную последовательность методом пондерации (согласования и уравнивания).

*Главный шахтный ствол, выбор местоположения ствола, мультимодельный анализ, угольная шахта “Велень”*

Выбор места строительства главного шахтного ствола является сложной многокритериальной задачей. Ее решение зависит не только от определения возможных местоположений для строительства и заданных критериальных условий, но и от применяемых в анализе методов. Поскольку в науке не существует единого мнения относительно выбора наиболее подходящего метода для обоснования принятия решений, эта проблема еще более усложняется.

Не каждому поколению инженеров, работающих в шахте, предоставляется возможность строить шахтный ствол. Такая уникальная возможность появилась у инженеров угольной шахты “Велень” в Словении. Эта шахта ежегодно производит около 5 млн т лигнита для нужд термоэлектростанции “Шоштань” (ТЭС). Два ключевых момента повлияли на принятие решения о строительстве нового шахтного ствола. Первый основан на том, что по мере удаления очистных забоев от шахтного ствола возрастают расходы на подземную транспортировку угля. Второй связан с тем, что строительство нового блока ТЭС требует реконструкции транспортной системы для доставки угля на поверхность шахты, а положение существующего шахтного ствола неудобно для запланированной реконструкции [1 – 2].

В мире известно большое число публикаций, посвященных решению задачи выбора оптимального местоположения шахтного ствола [3 – 6]. В Институте горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН разработаны методы и компьютерные программы, позволяющие найти численное решение данной задачи в виде областей оптимального местоположения главного шахтного ствола на поверхности шахты с учетом множества влияющих факторов: рельеф местности, транспорт-

ные расходы на перевозку полезного ископаемого в шахте и на поверхности, потери полезного ископаемого в охранных целиках под промплощадкой, качество полезного ископаемого, календарный план отработки месторождения, планируемая прибыль и др. [4 – 6].

Подготовка и управление такими сложными проектами, эффективность и надежность анализа и принятия решений требует декомпозиции задачи и применения адекватных методов [7 – 12]. В процессе декомпозиции нами установлено, что задача строительства шахтного ствола включает пять последовательных этапов решения. Одной из задач является выбор местоположения шахтного ствола.

Объективность решения вопроса выбора местоположения зависит не только от включения в анализ всех существенных параметров и надежности их метрики, но и от применяемого способа анализа, адекватных критериев и приписанных им преимуществ в конкретных условиях шахты [1 – 12]. Эти показатели предполагают применение многокритериальных методов. Из всей совокупности новых методов операционных исследований мы остановили выбор на следующих: PROMETHEE, ELECTRE, АНР и VIKOR, поскольку они получили подтверждение на практике и чаще всего используются.

Проблему отсутствия общенаучного согласия при оценке пригодности и выборе наиболее подходящего многокритериального метода для применения в конкретной ситуации можно успешно преодолеть [1 – 9]. Вместо выбора наиболее подходящего метода как основы для принятия решения, мы предлагаем процедурный подход, имея при этом в виду одновременное включение в анализ нескольких методов, которые корректно аппроксимируют мультивариабельные условия шахты, а так как целью является выбор не лучшей модели, а лучшего решения заданной проблемы [1, 7], то способ выбора более высокоранжированной альтернативы или наилучшей последовательности альтернатив протекает в зависимости от колебания мультимодельных рангов по отношению к определенной процедуре. В случае эквивалентности мультимодельных рангов полученная последовательность альтернатив принимается как окончательное решение, в противном случае окончательный порядок альтернатив определяется методом согласования и уравнивания [1].

Поскольку методы PROMETHEE, ELECTRE, АНР и VIKOR хорошо известны из литературы по операционным исследованиям, не будем приводить их концептуальное описание и математические модели. В центре внимания находится мультимодельный способ многокритериального выбора наиболее благоприятного местоположения нового шахтного ствола на угольной шахте “Велень”.

#### МОДЕЛИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Выбор места строительства выдачного шахтного ствола определяется многими факторами [1 – 6]. В угольной шахте “Велень” наиболее важными факторами являются следующие:

- оптимальное расположение ствола для транспортной связи с ТЭС;
- расположение ствола с учетом перемещения работ по выемке и соответственно изменения расстояния для транспортировки;
- условия в рабочей среде на потенциальном местоположении ствола (возможность появления метана), гидрогеологические и инженерно-геологические условия;
- удобное местоположение ствола по отношению к существующим инфраструктурным объектам шахты;
- строительные затраты.

В результате предварительного анализа выбор местоположения для строительства ствола свелся к четырем вариантам. На панорамном снимке промышленной зоны угольной шахты “Ве-

лень» (рисунок) красным кружком обозначено местоположение существующего шахтного ствола (JAŠEK NOP), а зелеными — предполагаемые местоположения нового ствола (А, В, С и D) [1].



Расположение существующего шахтного ствола (JAŠEK NOP) и потенциальных местоположений для строительства нового ствола (А, В, С и D)

Одновременное применение в анализе четырех многокритериальных методов (PROMETHEE, ELECTRE, АНР и VIKOR) требует формирования общей исходной модели, которая охватывает: альтернативы (в нашем случае это четыре возможных местоположения шахтного ствола (А, В, С и D), критерии (здесь их шесть, табл. 1), относительная значимость каждого из критериев (предпочтения, табл. 2). Обзор примененных критериев с метрикой и критериальными целями приводится в табл. 1, а в табл. 2 дается исходная матричная модель проблемы [1].

ТАБЛИЦА 1. Критерии для выбора наиболее оптимального местоположения шахтного ствола

Критерий	Описание	Метрика	Цель
$K_1$	Выгодность местоположения в аспекте транспортной связи с ТЭС	Качественная	max
$K_2$	Выгодность местоположения по отношению к концентрации и разворачиванию работ в шахте	»	max
$K_3$	Выгодность местоположения в аспекте инженерно-геологических и газометрических условий	»	max
$K_4$	Выгодность местоположения в аспекте гидрогеологических условий	»	max
$K_5$	Выгодность местоположения по отношению к инфраструктурным объектам шахты	»	max
$K_6$	Объем инвестиционных вложений в подготовку местоположения для строительства ствола	Количественная	min

Критериальные условия охватывают шесть критериев, причем пять из них ( $K_1 - K_5$ ) являются качественными, с границами оценки от 0 до 10. Шестой, количественный критерий  $K_6$ , выражен в денежном измерении ( $\times 10^6$  €). Критериальные цели определяются максимумом или минимумом, а значение критерия выражено предпочтением (значимостью); по оценкам проектной группы значения предпочтений следующие: 0.10 для  $K_5$ ; 0.25 для  $K_3$  и  $K_4$ ; 0.45 для  $K_1$  и  $K_2$  и самый большой 0.50 для  $K_6$  [1].

ТАБЛИЦА 2. Исходная матричная модель выбора местоположения выдачного ствола

Критерий		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
min/max		max	max	max	max	max	min
Предпочтение		0.45	0.45	0.25	0.25	0.10	0.50
Местоположение	A	2	8	4	5	9	5
	B	7	10	8	9	10	5.5
	C	8	8	6	6	6	5.5
	D	5	10	8	9	9	4.7

Чтобы не перегружать работу подробностями вычисления, приведем только конечные результаты анализа с применением методов PROMETHEE, ELECTRE, АНР и VIKOR [1] (табл. 3–6).

ТАБЛИЦА 3. Конечная матрица анализа, полученная методом PROMETHEE

Местоположение	A	B	C	D	$T^+$	T	Ранг
A		0.2500	0.3000	0.0000	0.1833	-0.5417	4
B	0.7500		0.5250	0.2750	0.5167	0.2750	2
C	0.4750	0.2250		0.2250	0.3083	-0.2250	3
D	0.9500	0.2500	0.7750		0.6583	0.4917	1
$T^-$	0.7250	0.2417	0.5333	0.1667			

ТАБЛИЦА 4. Конечная матрица анализа, полученная методом ELECTRE

Местоположение	A	B	C	D	Ранг
A		0	0	0	3
B	1		0	1	1
C	1	0		0	2
D	1	0	0		2

ТАБЛИЦА 5. Конечная матрица анализа, полученная методом АНР

Критерий	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	Результат	Ранг	
min/max	max	max	max	max	max	min			
Местоположение	A	0.090909	0.22222	0.153846	0.17241	0.264705	0.25759	0.18887	4
	B	0.318181	0.27777	0.307692	0.31034	0.294117	0.23418	0.28459	1
	C	0.363636	0.22222	0.230769	0.20689	0.176470	0.23418	0.25389	3
	D	0.227272	0.27777	0.307692	0.31034	0.264705	0.27404	0.27263	2
Предпочтение	0.225	0.225	0.125	0.125	0.05	0.25	0.225		

ТАБЛИЦА 6. Конечная матрица анализа, полученная методом VIKOR

$I_1$	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
$I_2$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	Ранг										
A	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
B	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
C	3	3	3	3	3	3	1	1	1	2	2
D	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для большей наглядности при сравнении рангов четырех анализируемых местоположений выдачного шахтного ствола, полученных посредством методов PROMETHEE, ELECTRE, АНП и VIKOR, составлена табл. 7, которая подтверждает оправданность сомнений о возможной неэквивалентности мультимодельных рангов [1].

Полная эквивалентность последовательности местоположений существует между методами PROMETHEE и VIKOR (для  $V_1 = 0.50$ ). Эквивалентность перворанжированных местоположений существует также между методами ELECTRE и VIKOR. Согласно методу ELECTRE, четыре анализируемых местоположения ранжированы в порядке от 1 до 3, а местоположения С и D принадлежат одному и тому же рангу.

ТАБЛИЦА 7. Сравнение последовательностей местоположений

Местоположение	PROMETHEE	ELECTRE	АНП	VIKOR ( $V_1 = 0.5$ )
	Ранг			
А	4	3	4	4
В	2	1	1	2
С	3	2	3	3
Д	1	2	2	1

Из табл. 7 видно, что местоположения В и D, которые занимают две первые и две вторые ранговые позиции, оценены одинаково и в целом имеют лучшие показатели по сравнению с местоположениями А и С. Колебания рангов, полученных указанными методами, объяснимы. С точки зрения причинно-следственных связей решения всех четырех методов стремятся к получению лучшей последовательности альтернатив в соответствии с заданными критериями, что подтверждает высокий процент корреляции (0.77). Колебания рангов являются следствием концептуальных различий между методами, различий в индексации предпочтений, в агрегатном доминировании конечных последовательностей и т. п. Решение дилеммы, какое местоположение (В или D) является наиболее выгодным, и принятие решения о месте строительства выдачного шахтного ствола требовало дополнительного анализа, который выполнен посредством согласования и уравнивания рангов (табл. 8). В результате анализа подтвердились преимущества местоположений В и D по отношению к местоположениям А и С, однако не ясно, какое из них наиболее выгодное [1].

ТАБЛИЦА 8. Выбор места строительства нового выдачного шахтного ствола

Местоположение	Метод/Ранг					
	PROMETHEE	ELECTRE	VIKOR	АНП	Оценка пондера	ПОНДЕР
А	4	3	4	4	1.25	3
В	2	1	2	1	3.50	1
С	3	2	3	3	2.25	2
Д	1	2	1	2	3.50	1

Сравнительное ранжирование местоположений В и D методом АНП, которое рекомендует в таких случаях, также не принесло результатов. Поэтому по принципам SWOT метода проведен более детальный анализ характерных признаков параметров для обоих местоположений, в результате чего установлено незначительное преимущество местоположения В [1].

## ВЫВОДЫ

Несмотря на сложность реальной проблемы, профессиональную подготовку, интересы, мотивацию и компетенцию участников процесса принятия решения, многокритериальные/многоатрибутивные методы успешно аппроксимируют мультивариабельные условия шахты “Веленье”. Однако в процессе анализа, когда нужно определить приоритеты или ранжировать альтернативы, надежность решения следует связывать не с выбором метода, а с процедурным процессом анализа и принятия решения, что подтверждается в нашем случае выбором местоположения главного шахтного ствола. Чтобы выполнить это корректно, необходимо соблюсти три принципа:

— фактографическая корректность (объективное и рациональное определение показательных признаков и исходных математико-модельных параметров для данной проблемы: альтернатив, критериев/атрибутов, их значимость, предпочтительность, условия);

— применение мультимодального подхода (параллельная математико-модельная обработка проблемы с одними и теми же исходными параметрами на нескольких модельных платформах);

— контроль выбора окончательного решения (анализ полученных модельных рангов, а в случае несовпадения рангов — вычисление последовательности (очередности) альтернатив как конечное решение способом согласования и уравнивания).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худей М. Мультивариабельные модели управления в горном деле / Белград. ун-т, Горно-геол. факультет; докт. дис. — Белград, 2013 (на сербском языке).
2. Bakhtavar E., Shahriar K., Oraee K. Transition from open-pit to underground as a new optimization challenge in mining engineering, *Journal of Mining Science*, 2009, Vol. 45, Issue 5.
3. Zambo J. Optimum location of mining facilities for safety and economy, *Akademia Kiado*, Budapest, 1968.
4. Стрекачинский Г. А. Теория и численные модели вскрытия месторождений. — Новосибирск: Наука, 1983.
5. Стрекачинский Г. А., Ордин А. А., Федорин В. А. Оптимальное размещение транспортных сетей на поверхности шахт. — Новосибирск: Наука, 1981.
6. Ордин А. А. Исследование численными методами способов вскрытия шахтного поля на примере шахты “Усинская-1” Печорского угольного бассейна: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1981.
7. Opricovic S., Gwo-Hshiung T. Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 178, No. 2.
8. Özfirat M. K. A fuzzy method for selecting underground coal mining method considering mechanization criteria, *Journal of Mining Science*, 2012, Vol. 48, Issue 3.
9. Vujić S., i dr. A location-allocation model of mining facilities planning at strategic level, *Proceedings of the VII International Symposium on Application of Mathematical Methods and Computers in Geology, Mining and Metallurgy*, Sophia, Bulgaria, 1998.
10. Vujić S. A comparative multi-criterion analysis of possible technologies used for selective mining, conveyance and dumping of solum at coal open pit mines of the Electric Power Industry of Serbia, *Annual of University of Mining and geology “St. Ivan Rilski”*, Part II: Mining and mineral processing, Vol. 47, Sofia, Bulgaria, 2004.
11. Vujić S., Miljanović I., et al. Multiattributive prediction of terrain stability above underground mining operations, *Yugoslav Journal of Operations Research*, 2011, Vol. 21, No. 2.
12. Вуйошевич М. Методы оптимизации в инженерном менеджменте / Академия инж. наук Сербии и Факультет организац. наук Белград. ун-та. — Белград, 2012 (на сербском языке).

*Поступила в редакцию 2/IX 2013*