

УДК 622.013

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ БЛАГОУСТРОЙСТВА
ДЕГРАДИРОВАННЫХ ЗЕМЕЛЬ КАРЬЕРА “КЛЕНОВНИК”
УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА “КОСТОЛАЦ”**

**Б. Димитриевич¹, С. Вуйич², И. Матич¹,
С. Маианац², Ж. Праштало², Й. Николич², В. Чолакович²**

¹Белградский университет, E-mail: bojan.dimitrijevic@rgf.bg.ac.rs,
г. Белград, Республика Сербия

²Горный институт, E-mail: slobodan.vujic@ribeograd.ac.rs,
г. Белград, Республика Сербия

Угольный карьер “Кленовник” в Костолацком угольном бассейне выведен из производственной эксплуатации из-за истощения запасов угля. Началась работа по проектированию рекультивации и благоустройства деградированных земель. Ключевая проблема — выбор способа рекультивации. Учитывая цели рекультивации и окружающие условия, на основании анализа влиятельных факторов и определения критериев осуществления проекта, выделено 10 возможных решений. Как ранжировать альтернативы и обоснованно выбрать лучшую из них — такую задачу решают с помощью многоатрибутного метода принятия решений Promethee и Electre.

Рекультивация, угольный карьер, многоатрибутный и многокритериальный анализ, принятие решений

Добыча и переработка минерального сырья, или горное дело, имеет репутацию “экологически грязной” отрасли промышленности и является объектом особого внимания общества, вызывая различного рода сомнения, заблуждения, подвергается критике, ограничениям, контролю [1]. Перед этой отраслью постоянно ставятся все новые условия и требования. Можно утверждать, что такое положение дел существует с давних пор, так как техника и природа, индустрия и ландшафт находятся в состоянии противостояния. Горные работы и прежде всего открытая добыча минерального сырья изменяют местность, сопровождаются отрицательными визуальными эффектами и бесплодием земель [2].

С помощью рекультивации можно успешно восстановить деградированные земли и создать возможность их дальнейшего использования для следующих целей:

- возвращение природных функций деградированному пространству;
- создание новых экономических и других объектов на восстановленных землях;
- уважение интересов общественных групп;
- создание благоприятных условий для инвестирования в рекультивацию;
- соблюдение стандартов, законов и нормативов.

Доминирующая цель рекультивации — достижение таких биологических эффектов на вновь сформированных землях, которые позволят как можно полнее осуществить функцию защиты и визуального слияния восстановленных земель с окружающей средой [2, 3]. Ошибочное истолкование доминирующей цели создает упрощенное понимание рекультивации как совокупности биологических мер. Принять такое понимание, значит пренебречь тем фактом, что рекультивация есть комплекс горных технико-технологических, мелиорационных, сельскохозяйственных, озеленительных, строительных, гидротехнических, декоративно-садоводческих и других работ, которые выполняются с целью приведения деградированных земель в состояние, пригодное для новых предназначений, таких как: сельскохозяйственные и лесные угодья, парк, пространство для занятий спортом и рекреации, водоем (для водных видов спорта, промышленного и спортивного рыболовства, водоснабжения и т. п.), пути сообщения, музеи, населенные пункты, жилищные и промышленные объекты и др.

Процесс поиска рекультивационного решения предполагает анализ пространственных возможностей, создание альтернативных решений и критериальный выбор компромиссного или лучшего решения для данных условий [1, 2]. Проблема выбора рекультивационного решения является по своей природе задачей многоатрибутной или многокритериальной, которая требует адекватного подхода к ее решению.

Выбор одного из множества возможных решений рекультивации подразумевает распознавание альтернативы, которая в заданных условиях по определенным критериям будет ранжирована лучше других. В этом процессе необходимо выделить цели рекультивации, критерии, которыми измеряется их достижение, способ выбора рекультивационного решения, которое наилучшим образом отвечает поставленной задаче. Кроме идентификации и определения возможных решений рекультивации (альтернатив), требуется установить критерии и оценить предложенные альтернативы по их характерным чертам, определить удельный вес (предпочтения или факторы весомости) критериев. Окончательное решение проблемы зависит не только от количества предложенных альтернатив, заданных критериев и предпочтений, но также от модели, метода или подхода, применяемого для анализа, а также в значительной мере от профессионализма и объективности всех, кто участвует в процессе принятия решений [4, 5].

В настоящее время используются различные подходы к решению этой категории проблем. В работе представлен один из возможных подходов, основанный на многокритериальном или многоатрибутном анализе. Его применение демонстрируется на примере рекультивации эксплуатационного поля угольного карьера “Кленовник” в угольном бассейне “Костолац”.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПОЛЯ УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА “КЛЕНОВНИК”

Угольный разрез по добыче лигнита “Кленовник” в Костолацком угольном бассейне, расположенном недалеко от Белграда, после 30 лет работы выведен из производственной эксплуатации из-за истощения запасов угля. Началась работа по проектированию рекультивации и благоустройства деградированных земель, при этом ключевой проблемой является вопрос о том, какой способ рекультивации данного участка земли применить. Чтобы понять изучаемую проблему, рассмотрим основные характеристики поверхности эксплуатационного поля угольного карьера “Кленовник” [6].

Морфология рельефа в районе эксплуатационного поля холмистая, высота местности над уровнем моря составляет 130–150 м. Место, на котором расположено эксплуатационное поле, представляет собой возвышение, которое доминирует над окружающими равнинами (рис. 1). Земли вокруг эксплуатационного поля используются для выращивания сельскохозяйственных культур, разведения садов, а небольшая их часть занята лесными угодьями [6].

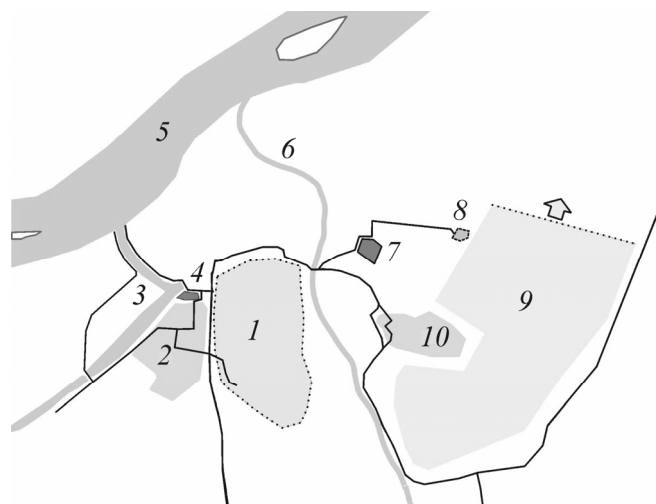


Рис. 1. Схема пространственного положения эксплуатационного поля "Кленовник" и наиболее значительных объектов вокруг: 1 — эксплуатационное поле "Кленовник"; 2 — г. Костолац; 3 — канал; 4 — теплоэлектростанция А; 5 — р. Дунай; 6 — р. Млава; 7 — теплоэлектростанция Б; 8 — г. Виминациум; 9 — карьер "Дрмно"; 10 — с. Дрмно

Кроме вышеприведенных сведений, для выбора решения рекультивации большое значение имеют и следующие факторы: близость Белграда с населением более 2 млн чел., а также городов Пожаревац и Смедерево, хорошие коммуникационные связи по Дунаю и сухопутные дороги, традиции горнодобывающей отрасли и интересы местного населения, а также общая поверхность деградированных земель ($2.721.000 \text{ м}^2$) [6].

Традиционно определенная цель рекультивации деградированной местности эксплуатационного поля "Кленовник", выраженная в намерении сформировать новую среду, которая вписывалась бы в существующий ландшафт и имела бы стабильные экономические объекты, рождает десяток возможных решений со следующими частичными или комбинированными назначениями: исследовательский и / или образовательный центр (защита природы, археология, природные ресурсы и др.), сельское хозяйство, лесное хозяйство, парк, спорт, отдых и рекреация, небольшие водоемы, реституция земель, спонтанное наследование, музей, галерея, населенный пункт, промышленные объекты, свалка и др. [7].

Многочисленность предлагаемых альтернативных решений рекультивации, разнообразие комбинаций, а также количество критериальных условий, которым выбранное решение должно удовлетворять, ставит вопрос о том, как объективно ранжировать предложенные решения и выделить самое лучшее. Ответ на этот вопрос получен с применением многокритериальных методов принятия решения Promethee и Electre.

МОДЕЛЬ ПРОБЛЕМЫ

Анализ выполнимости, проведенный с учетом ключевых целей рекультивации (восстановление природных функций, создание новых объектов, экономическая прочность), а также с учетом реальных условий местности и окружающей среды, позволил выделить 10 возможных решений рекультивации и благоустройства деградированной поверхности эксплуатационного поля угольного карьера "Кленовник". Многочисленность альтернативных решений объясняется как характеристиками самой местности и ее пригодностью для различных форм рекультивации, так и благоприятными окружающими условиями и, конечно, изобретательностью проектной группы, предложившей различные идеи [7]. Обзор предложенных альтернативных решений рекультивации дается в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Обзор предложенных альтернативных решений рекультивации

Обозначение	Альтернативное решение	Комбинация альтернатив
A ₁	Лесное хозяйство	
A ₂	Сельское хозяйство: хлебопашество и овощеводство	
A ₃	Сельское хозяйство: садоводство и виноградарство	
A ₄	Сельское хозяйство	A ₂ , A ₃
A ₅	Лесное и сельское хозяйство	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄
A ₆	Водный комплекс (спорт, рекреация, рыболовство)	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄
A ₇	Спортивно-рекреативный комплекс	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅ , A ₆
A ₈	Парковое устройство и декоративно-садовое устройство	A ₆ , A ₇
A ₉	Музейный и культурно-исторический комплекс	A ₁ , A ₆ , A ₇ , A ₈
A ₁₀	Спонтанная сукцессия и авторекультивация	

Кроме содержательной структуры, функциональности, выполнимости и стоимости предложенных решений, ранжирование зависит от поставленных критериальных условий и их удельного веса. В процессе анализа проектная группа пришла к выводу, что 11 критериев охватывают все существенные условия (технико-технологические, организационные, экологические, экономические, социальные, культурные, урбанистические, пейзажные и др.) для ранжирования и выбора лучшего решения рекультивации [7]. Обзор критериев для оценки альтернатив, включая метрику, удельный вес и цели, приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Обзор критериев для оценки альтернатив

Обозначение	Критерий	Метрика		Удельный вес	Цель
		M ₁	M ₂		
C ₁	Объем инвестиционных вложений на единицу площади	×		0.80	C ₁ →min
C ₂	Инвестиционный период — время инвестирования	×		0.60	C ₂ →max
C ₃	Время возврата вложенных средств	×		0.60	C ₃ →min
C ₄	Годовые расходы постоянного поддержания на единицу площади	×		0.80	C ₄ →min
C ₅	Вписываемость рекультивационного решения в общий стиль местности		×	0.85	C ₅ →max
C ₆	Потребности и интересы местного населения		×	1.00	C ₆ →max
C ₇	Технологическая сложность восстановительных работ		×	0.30	C ₇ →min
C ₈	Организационная требовательность к выполнению восстановительных работ		×	0.30	C ₈ →min
C ₉	Продолжительность (время) поддержания восстановленной местности	×		0.80	C ₉ →min
C ₁₀	Процентная доля варианта рекультивации в общем объеме работ	×		0.10	C ₁₀ →max
C ₁₁	Социальное и экономическое значение рекультивации для местного населения		×	0.95	C ₁₁ →max

Примечание. M₁ — количественная метрика; M₂ — качественная.

Шесть критериев имеют количественную метрику и пять — качественную. В оперативной математической модели параметры критерия должны быть выражены цифровыми показателями, поэтому необходимо осуществить конверсию вербальных оценок качественных критериев в эквивалентные цифровые показатели. Чтобы минимизировать влияние субъективности, группа определила шкалу конверсии оценок (табл. 3) [7]. Согласно этой шкале, критерий C_5 имеет четырехстепенные, а критерии C_6 , C_7 , C_8 и C_{11} — трехстепенные вербальные оценки. Шкала эквивалентных цифровых показателей оценок качественных критериев, которые стремятся к максимуму (C_5 , C_6 и C_{11}), располагается в границах от 10 до 0.5, а критериев, которые стремятся к минимуму (C_7 и C_8), — от 0.5 до 10.

ТАБЛИЦА 3. Корреляция вербальных и цифровых оценок качественных критериев

Цифровая оценка		Качественный критерий				
		C_5	C_6	C_7	C_8	C_{11}
		Цель				
		max	max	min	min	max
max	min	Вербальная оценка				
10.0	0.5	Отлично вписывается	Высокая потребность	Менее сложная технология	Меньшая организационная требовательность	Большое социальное и экономическое значение
9.5	1.0					
9.0	1.5					
8.5	2.0					
8.0	2.5					
7.5	3.0	Очень хорошо вписывается	Средняя потребность	Сложная технология	Требовательная организация	Среднее социальное и экономическое значение
7.0	3.5					
6.5	4.0					
6.0	4.5					
5.5	5.0					
5.0	5.5	Хорошо вписывается	Низкая потребность	Очень сложная технология	Очень требовательная организация	Меньшее социальное и экономическое значение
4.5	6.0					
4.0	6.5					
3.5	7.0					
3.0	7.5					
2.5	8.0	Слабо вписывается	Низкая потребность	Очень сложная технология	Очень требовательная организация	Меньшее социальное и экономическое значение
2.0	8.5					
1.5	9.0					
1.0	9.5					
0.5	10.0					

В решении изучаемой проблемы приняты предпочтительные границы варьирования удельного веса критерия от 0.10 до 1.00. По оценке группы (табл. 4) критерий C_{11} является самым важным, его удельный вес составляет 0.85, затем идут критерии C_1 , C_4 и C_9 с удельным весом 0.80 и т. д. Самое низкое значение имеет критерий C_{10} с удельным весом 0.10. На этих положениях сформирована начальная модель многокритериального ранжирования и выбора лучшего решения рекультивации эксплуатационного поля угольного карьера “Кленовник”.

ТАБЛИЦА 4. Начальная модель многокритериального ранжирования и выбора решения рекультивации

Показатель	Критерий											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	
min/max	min	max	min	min	max	max	min	min	min	max	max	
Удельный вес	0.80	0.60	0.60	0.80	0.85	1.00	0.30	0.30	0.80	0.10	0.95	
Альтернативное решение рекультивации	A ₁	10	7	14	2	9	6	4	4	8	90	8.5
	A ₂	15	4	8.5	4	9	8.5	6	6	8	75	10
	A ₃	17	5	12	5.5	9	8.5	7	5	8	85	10
	A ₄	25	4	11	8	9	6	8.5	7	8	97	8
	A ₅	14	7	12	3	10	9	7.5	5.5	8	87	9
	A ₆	27	7	14	7	8	4	9	6.5	15	85	5
	A ₇	32	4	12	8	9.5	9.5	10	7	15	94	7
	A ₈	25	4	12	8.5	9	8.5	9.5	6	12	100	8
	A ₉	37	4	12	8.5	9	10	10	8	12	100	9
	A ₁₀	2	1.5	20	0.01	2	2	0.5	0.5	1.5	100	0.5

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Принимая во внимание тот факт, что многокритериальные или многоатрибутные анализы не всегда дают эквивалентные результаты в решении одной и той же задачи, анализ ранжирования и выбора рекультивационного решения выполнен с использованием двух методов: Promethee и Electre. Выбор этих методов не является случайным. Они занимают особое место среди других многокритериальных и многоатрибутных методов благодаря частому применению в практике и их проверенной практикой надежности [2]. Математические модели методов Promethee и Electre описаны в многочисленной литературе по операционным исследованиям. В табл. 5 и 6 представлены окончательные результаты многокритериального анализа, а именно порядок расположения (последовательность) альтернатив в соответствии с методами Promethee и Electre.

ТАБЛИЦА 5. Окончательная матрица вычисления методом Promethee

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	T+	T	Ранг
A ₁		0.4085	0.4085	0.5282	0.3239	0.8310	0.6408	0.6408	0.5070	0.5634	0.5391	0.2387	4
A ₂	0.3592		0.3521	0.6690	0.2606	0.9014	0.6408	0.5986	0.6408	0.5634	0.5540	0.3130	2
A ₃	0.3592	0.1408		0.6690	0.2183	0.9014	0.6408	0.6408	0.6408	0.5634	0.5305	0.2629	3
A ₄	0.0986	0.0141	0.0986		0.0986	0.7606	0.5000	0.3521	0.5070	0.5634	0.3326	-0.1205	5
A ₅	0.4789	0.6268	0.5845	0.7887		0.9155	0.7606	0.9014	0.6268	0.5634	0.6941	0.5094	1
A ₆	0.0000	0.0986	0.0845	0.2394	0.0000		0.3944	0.2394	0.3944	0.5634	0.2238	-0.5102	10
A ₇	0.3592	0.2746	0.2746	0.2606	0.1549	0.4930		0.3732	0.3873	0.5634	0.3490	-0.1925	8
A ₈	0.2394	0.0141	0.0141	0.1972	0.0141	0.7606	0.4577		0.1972	0.5634	0.2731	-0.2207	9
A ₉	0.3732	0.1549	0.1549	0.2887	0.1549	0.6056	0.4014	0.2746		0.5634	0.3302	-0.1502	7
A ₁₀	0.4366	0.4366	0.4366	0.4366	0.4366	0.4366	0.4366	0.4225	0.4225		0.4335	-0.1299	6
T ⁻	0.3005	0.2410	0.2676	0.4531	0.1847	0.7340	0.5415	0.4937	0.4804	0.5634			

Сопоставление полученных модельных последовательностей (табл. 7) показывает эквивалентность альтернатив: A₅, находящейся на первом месте, A₂ — на втором и A₃ — на третьем. В последовательности альтернатив, полученной с помощью метода Electre, три пары имеют один и тот же ранг: альтернативы A₁ и A₃ — ранг 3, альтернативы A₄ и A₇ — ранг 6, а альтернативы A₆ и A₁₀ находятся на позиции 7 в последовательности. В отличие от метода Promethee, где альтернативы ранжированы в последовательности от 1 до 10, в методе Electre альтернативы ранжированы от 1 до 7.

ТАБЛИЦА 6. Окончательная матрица вычисления методом Electre

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	Ранг
A ₁		0	0	1	0	1	1	1	1	1	3
A ₂	0		1	1	0	1	1	1	1	1	
A ₃	0	0		1	0	1	1	1	1	1	3
A ₄	0	0	0		0	1	0	0	0	0	6
A ₅	1	1	1	1		1	1	1	1	1	
A ₆	0	0	0	0	0		0	0	0	0	7
A ₇	0	0	0	0	0	1		0	0	0	6
A ₈	0	0	0	0	0	1	1		1	0	4
A ₉	0	0	0	0	0	1	1	0		0	5
A ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0		7

ТАБЛИЦА 7. Сопоставительный показ последовательностей альтернатив

Альтернативное решение рекультивации	Метод		Эквивалентность ранга
	Promethee	Electre	
	Ранг		
A ₁	4	3	Нет
A ₂	2	2	Да
A ₃	3	3	Да
A ₄	5	6	Нет
A ₅	1	1	Да
A ₆	10	7	Нет
A ₇	8	6	Нет
A ₈	9	4	Нет
A ₉	7	5	Нет
A ₁₀	6	7	Нет

Возможное несоответствие последовательностей альтернатив, полученных различными методами многокритериального принятия решений, не влияет на выбор лучшего решения рекультивации эксплуатационного поля угольного карьера “Кленовник”, поскольку не существует несогласия по поводу альтернативы, занимающей первый ранг. Оба метода показывают, что лучшим решением рекультивации является альтернатива A₅ — комбинация лесного и сельского хозяйства (альтернативы A₁, A₂, A₃ и A₄), при этом сельское хозяйство включает хлебопашество, овощеводство, садоводство и виноградарство.

Соответствие полученных различными методами решений относительно альтернативы A₂, находящейся на втором месте и обозначающей сельское хозяйство с разведением зерновых культур и овощеводством, а также альтернативы A₃, находящейся на третьем месте и относящейся к сельскому хозяйству с садоводством и виноградарством, имплицитно подтверждает, что альтернатива A₅ является лучшим решением. Именно это решение коллегия инженеров и менеджмент Костолацкого угольного бассейна приняли как приоритетное в дальнейшей деятельности по проектированию рекультивации и благоустройства поверхности эксплуатационного поля угольного карьера “Кленовник”.

ВЫВОДЫ

В контексте изложенного можно выделить два существенных момента. Первый состоит в том, что успешность многокритериального подхода к решению рассмотренного класса проблем зависит от тщательности анализа влиятельных факторов, ограничений, изучения альтернатив, выбора и определения критериев, целей и предпочтений принимающих решение лиц. Субъективность принятия решений участниками процесса можно свести к минимуму процедурой совместной работы и коллективного выбора альтернатив.

Второй момент состоит в том, что нет общепринятой и проверенной на практике методологии выбора адекватного метода многокритериального анализа для конкретных реальных условий. Но цель состоит не в выборе адекватного метода, а в выборе лучшего решения поставленной задачи. Однако выбор лучшего решения может быть под угрозой из-за возможности расхождения модальных последовательностей. Чтобы устранить этот недостаток и повысить надежность ранжирования альтернатив, при проведении многокритериального анализа рекомендуется применять как минимум два метода вычисления. Решение о принятии лучшей альтернативы зависит от окончательного распределения последовательностей альтернатив в обоих методах, и оно может быть окончательным или послужить ориентиром для дальнейшего анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ordin A. A.** Ecological-Economic Evaluation of Status and Future Line of Development of Coal Mining in the Kuznetsk Basine, *Journal of Mining Science*, 1994, Vol. 30, No. 2.
2. **Вуйич С., Цвейич Й., Милянвич И., Дращич Д.** Проектирование рекультивации и благоустройства поверхности открытых карьеров. — Белград. ун-т, Горно-геол. фак. и Академия инж. наук Сербии, 2009.
3. **Bubnova M. B., Ozaryan Yu. A.** Geocological Valuation of Natural and Mine Engineering Systems on the South of the Far East, *Journal of Mining Science*, 2012, Vol. 48, No. 5.
4. **Godoy M., Dimitrakopoulos R. and Risk A.** Quantification Framework for Strategic Mine Planning: Method and Application, *Journal of Mining Science*, 2011, Vol. 47, No. 2.
5. **Худей М.** Мультивариабельные модели управления в горном деле: докт. дис. — Белград. ун-т, Горно-геол. фак., 2013.
6. **Вуйич С., Макар Н., Николич Й. и др.** Главный горный проект завершения эксплуатации угольного карьера “Кленовник”: документация Горного ин-та. — Белград, 2013.
7. **Димитриевич Б.** Оптимизация процессов рекультивации угольных карьеров: рабочая версия докт. дис. — Белград. ун-т, Горно-геол. фак., 2013.

Поступила в редакцию 22/XII 2013