

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 502.5

ВЫБОР ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРА

И. Алави¹, А. Ибрахибади², Х. Хамидиан¹

¹Исламский университет Азад, Каэмихрский филиал,
E-mail: Arash.xer@gmail.com, г. Каэмихр, Иран

²Исламский университет Азад, Центральный Тегеранский филиал, г. Тегеран, Иран

Рекультивация территорий карьеров должна планироваться на самых ранних этапах ведения горных работ. Согласно плану восстановления земель на медном руднике Сунгун в Иране, наиболее подходящий для этого вариант — посадка деревьев. При выборе их вида должны учитываться все параметры и критерии. Выбор вида растения относится к многокритериальной задаче принятия решений (MCDM), поэтому для анализа и достоверности результатов использовались методы PROMETHEE и ELECTRE. Опросом экспертов сформирована матрица решений, а затем с помощью указанных методов выполнено их ранжирование. Выявлено, что наиболее подходящим растением с наибольшими баллами по методам ELECTRE и PROMETHEE является клен трехлопастный.

Восстановление земель, типы растений, медный карьер Сунгун, методы PROMETHEE и ELECTRE, клен трехлопастный

DOI: 10.15372/FTPRPI20220118

Открытые горные работы влияют на форму рельефа, водное и атмосферное состояние области отработки [1]. В настоящее время этап использования земель после добычи рассматривается как ключевой этап соответствия горнодобывающей промышленности принципам устойчивого развития [2, 3]. Рекультивация земель — важный фактор охраны окружающей среды, позволяющий вернуть поверхность земли в ее естественное состояние с пригодным ландшафтом для роста растений и обитания животных [4]. Недостаток финансирования на восстановление земель привел к ухудшению ее качества [5]. В случаях, когда невозможно использовать методы технического восстановления, следует применять биологическую рекультивацию земель [6]. Для больших действующих месторождений используется прогрессивное восстановление с целевым назначением земли, таким как сельское хозяйство, лесонасаждение, пастбище, сооружение озер и гражданское строительство [7]. Лесные насаждения применяются в регионах с низким плодородием и требуют меньшей степени удобрения. Кис-

лотность вынутых пустых пород составляет 6.0–7.5, что идеально для заготовки корма и других сельскохозяйственных и садовых целей [8]. Природные удобрения (древесные опилки, компост, навоз, твердые биологические отходы) повышают кислотность почвы, способность водоудержания и выполняют функцию микробиологического посевного материала [9]. В отвалах вмещающих пород наблюдается недостаток основных питательных веществ: азота, фосфорных соединений и калия. Любые вмещающие породы требуют удобрения [10, 11]. Удержание воды и питательных веществ в минеральных почвах происходит в частицах размером менее 5 мм [12]. В условиях холодного климата для роста растений достаточно 5 % среднего содержания влаги, для жаркого климата — 2–3 % [13]. В условиях продолжительной засухи для удержания влаги требуется слой рыхлой почвы толщиной 0.9–1.3 м. Отвалы пустой породы с уклоном более 15 % непригодны для выращивания зерновых культур, они используются для пастбищ или лесных насаждений [14]. Ярко-красный и коричневый цвет вмещающих пород и минеральных почв говорит об их выветривании и выщелачивании. Возможно, данный материал имеет низкое значение pH, низкую плодородность, малое содержание пиритов и обладает большим потенциалом к физическому выветриванию [15].

В [16] дан обзор работ по восстановлению заброшенных карьеров путем посадки растений. В [17] выполнена оценка затрат на рекультивацию земли после горнодобывающей деятельности. В [18] исследована возможность повторного использования земли в районе карьера Сунгун и сделан выбор в пользу лесных насаждений. В [19] осуществлена оценка затрат для удобрения восстановленных земель на востоке штата Кентуки. В [20] выбраны наиболее подходящие растения для восстановления земли карьера Сунгун с помощью методов АНР и TOPSIS, а в [21] — подходящие растения для восстановления земли карьера Серчешме в провинции Керман. Закрытие горной выработки и связанные с ним затраты на рекультивацию изучены в [22]. На основе моделирования в [23] предложена методика оценки времени и затрат по закрытию карьера, в [24] — общая методика контроля риска эксплуатации горной выработки. В [2] рассмотрен выбор растения для восстановления земли в районе железорудного карьера Чогхарт с помощью методов PROMETHEE и TOPSIS.

Цель настоящей работы — исследование состояния окружающей среды в районе карьера Сунгун с учетом ключевых параметров восстановления земли после горнодобывающей деятельности. Полученные данные проанализированы методами принятия многокритериальных решений. Окончательный подсчет баллов выполнен методами ELECTRE и PROMETHEE. Весовые значения определены с помощью метода анализа иерархий, далее с помощью методов ELECTRE и PROMETHEE выбрано наиболее подходящее растение. Результаты и предложенные варианты рассмотрены администрацией карьера для проведения частичной посадки.

ОПИСАНИЕ ОБЛАСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Медный карьер Сунгун расположен в горной области провинции Восточный Азербайджан (Иран). Карьер имеет крутые склоны, наиболее высокая точка 2467 м над ур. м., нижняя часть карьера расположена на отм. 1777 м. Благодаря умеренному климату в регионе имеется плотная растительность. Среднее годовое количество осадков 376 мм, средняя годовая влажность 70.2 %, температура воздуха в течение года изменяется от –15.5 до 29.3 °C [25]. Запасы карьера составляют 706 млн т руды со средним содержанием меди 7.6 %. Период разработки карьера спланирован на 31 год. Ожидается, что запасы пригодной к добыче руды составят 388 млн т, с отходами 632 млн т.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор растений — ключевой этап достижения цели восстановления земель после горнодобывающей деятельности. Растения повышают объем органической материи в почве, сокращают ее объемную плотность, регулируют pH и распределяют питательные вещества. Посадка осуществляется как местными растениями, характерными для данной области, так и привезенными растениями, более устойчивыми и эффективно стабилизирующими почву. Перед посадкой землю необходимо покрыть слоем плодородной почвы, так как она биологически активна и богата минералами. Следующим шагом является сбор семян местных растений и растений из других регионов. Собранные семена могут быть посажены в почву сразу или высажены отдельно, а после пересажены в почву при достаточном уровне роста. Посадка местных растений более приоритетна [26, 27].

Выбираются растения, соответствующие характеру дальнейшего использования земли. Критерий выбора включает экономические, технические, экологические, эстетические, социальные параметры и параметры горной выработки, соответствующие ее устойчивому состоянию [24]. Рассматриваются только применимые в данном регионе варианты использования земли. Качество почвы — критерий, по которому отклоняются неподходящие варианты [28]. Восстановление земли рассматривается как эффективная мера предотвращения преждевременного закрытия горных работ.

Методы принятия многокритериальных решений делятся на две категории: методы многоцелевых решений и методы многосвойственных решений [29]. Многоцелевые методы используются для планирования, постановки и взаимной оптимизации множественных целей, многосвойственные — для оценки, расстановки приоритетов и выбора из различных альтернатив на основе заданного критерия, который ассоциируется с весовым значением [30].

Методы принятия многокритериальных решений — эффективный способ решения возникающих задач. Подпараметры (подкритерии), анализируемые методами ELECTRE и PROMETHEE: локальный ландшафт, сопротивляемость вредителям, способность роста растений, пригодность земель, экономические параметры, параметры защищенности почвы, способность водоудержания и предотвращение загрязнения. Весовые значения параметров w_j , полученные методом анализа иерархий (MCDM): 0.187, 0.166, 0.088, 0.138, 0.088, 0.166, 0.166.

Выбор растения для медного карьера Сунгун методом PROMETHEE

1. Создание оценочной таблицы. Количественные значения показателей получены на основе опроса экспертов, как и по пятибалльной шкале Лайкерта: 1 — крайне низкий; 2 — низкий; 3 — средний; 4 — высокий; 5 — крайне высокий [31]. Матрица критериев оценки вариантов составлена по результатам экспертизы горных инженеров, инженеров по охране окружающей среды и природных ресурсов, а также по шкале Лайкерта:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
<i>A</i>	5	5	5	5	5	5	5
<i>B</i>	4	4	3	3	3	3	2
<i>C</i>	5	5	3	4	4	5	4
<i>D</i>	4	4	2	4	2	2	4
<i>E</i>	4	4	2	5	2	2	3
<i>F</i>	3	3	2	3	2	2	3

Здесь *A* — клен трехлопастный; *B* — дуб крупнопольниковый; *C* — ясень обыкновенный; *D* — рис обыкновенный; *E* — держидерево; *F* — алыча.

2. Расчет функции предпочтения. Позволяет разделить значения двух вариантов в рамках одного критерия по шкале предпочтения, диапазон которой от 0 до 1:

$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b), \quad a \in A, \quad b \in B, \quad \text{если } d_j(a, b) \leq 0, \text{ то } P_j(a, b) = 0, \\ \text{если } d_j(a, b) > 0, \text{ то } P_j(a, b) = 1.$$

Так как все критерии подтверждены, проведено сравнение величин со значением 1 или близким к нему и значением 0 друг с другом [32] ($f_j(b) - f_j(a)$ представлены как p_j в табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Попарное сравнение матриц вариантов

C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1		C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
1	0	0	1	0	0	0	$E-B$	1	1	1	1	1	1	1	$A-B$
0	0	1	0	1	1	1	$B-F$	0	0	0	0	0	0	0	$B-A$
1	0	0	0	0	0	0	$F-B$	1	0	1	1	1	0	0	$A-C$
0	1	1	0	1	1	1	$C-D$	0	0	0	0	0	0	0	$C-A$
0	0	0	0	0	0	0	$D-C$	1	1	1	1	1	1	1	$A-D$
1	1	1	0	1	1	1	$C-E$	0	0	0	0	0	0	0	$D-A$
0	0	0	1	0	0	0	$E-C$	1	1	1	0	1	1	1	$A-E$
1	1	1	1	1	1	1	$C-F$	0	0	0	0	0	0	0	$E-A$
0	0	0	0	0	0	0	$F-C$	1	1	1	1	1	1	1	$A-F$
1	0	0	0	0	0	0	$D-E$	0	0	0	0	0	0	0	$F-A$
0	0	0	1	0	0	0	$E-D$	0	0	0	0	0	0	0	$B-C$
1	0	0	1	0	1	1	$D-F$	1	1	1	1	0	1	1	$C-B$
0	1	0	0	0	0	0	$F-D$	0	1	1	0	1	0	0	$B-D$
0	0	0	1	0	1	1	$E-F$	1	0	0	1	0	0	0	$D-B$
0	1	0	0	0	0	0	$F-E$	0	1	1	0	1	0	0	$B-E$

3. Расчет общей функции предпочтения. Кумулятивный индекс предпочтения рассчитывается по формуле

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k p_j(a, b) w_j.$$

Результаты приведены в табл. 2.

4. Расчет положительных и отрицательных потоков для каждого варианта. Положительный превосходящий поток рассчитывается как

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x),$$

отрицательный —

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a).$$

Максимальное значение $\phi^+(a)$ соответствует лучшему варианту, минимальное значение $\phi^-(a)$ характеризует худший вариант [33, 34].

ТАБЛИЦА 2. Матрица приоритетов вариантов относительно друг друга по всем критериям

Общий индекс предпочтения	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
0.999	0.166	0.166	0.088	0.138	0.088	0.166	0.187	$A-B$
0	0	0	0	0	0	0	0	$B-A$
0.48	0.166	0	0.088	0.138	0.088	0	0	$A-C$
0	0	0	0	0	0	0	0	$C-A$
0.999	0.166	0.166	0.088	0.138	0.088	0.166	0.187	$A-D$
0	0	0	0	0	0	0	0	$D-A$
0.861	0.166	0.166	0.088	0	0.088	0.166	0.187	$A-E$
0	0	0	0	0	0	0	0	$E-A$
0.999	0.166	0.166	0.088	0.138	0.088	0.166	0.187	$A-F$
0	0	0	0	0	0	0	0	$F-A$
0	0	0	0	0	0	0	0	$B-C$
0.911	0.166	0.166	0.088	0.138	0	0.166	0.187	$C-B$
0.342	0	0.166	0.088	0	0.088	0	0	$B-D$
0.304	0.166	0	0	0.138	0	0	0	$D-B$
0.342	0	0.166	0.088	0	0.088	0	0	$B-E$
0.304	0.166	0	0	0.138	0	0	0	$E-B$
0.529	0	0	0.088	0	0.088	0.166	0.187	$B-F$
0.166	0.166	0	0	0	0	0	0	$F-B$
0.695	0	0.166	0.088	0	0.088	0.166	0.187	$C-D$
0	0	0	0	0	0	0	0	$D-C$
0.861	0.166	0.166	0.088	0	0.088	0.166	0.187	$C-E$
0.138	0	0	0	0.138	0	0	0	$E-C$
0.999	0.166	0.166	0.088	0.138	0.088	0.166	0.187	$C-F$
0	0	0	0	0	0	0	0	$F-C$
0.166	0.166	0	0	0	0	0	0	$D-E$
0.138	0	0	0	0.138	0	0	0	$E-D$
0.657	0.166	0	0	0.138	0	0.166	0.187	$D-F$
0.166	0	0.166	0	0	0	0	0	$F-D$
0.491	0	0	0	0.138	0	0.166	0.187	$E-F$
0.166	0	0.166	0	0	0	0	0	$F-E$

5. Расчет результирующего потока. Для завершения ранжирования вариантов используется уравнение результирующего потока: $\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$ [33].

Выбор растения для медного карьера Сунгун методом ELECTRE

Метод ELECTRE описан в [35, 36]. Его основа — неранжируемые соотношения — не всегда результат ранжирования вариантов. Шаги принятия решения по методу ELECTRE следующие.

1. Создание оценочной таблицы. Матрица оценки вариантов совпадает с матрицей метода PROMETHEE.

2. Создание безмасштабной матрицы. Значения из матрицы критериев оценки вариантов возводятся в квадрат, суммируются и из суммы извлекается корень. В итоге получается безмасштабная матрица:

0.4834	0.4834	0.4834	0.4834	0.4834	0.4834	0.4834
0.3867	0.3867	0.2900	0.2900	0.2900	0.2900	0.1933
0.4834	0.4834	0.2900	0.3867	0.3867	0.4834	0.3867
0.3867	0.3867	0.1933	0.3867	0.1933	0.1933	0.3867
0.3867	0.3867	0.1933	0.4834	0.1933	0.1933	0.2900
0.2900	0.2900	0.1933	0.2900	0.1933	0.2900	0.2900

3. Создание взвешенной безмасштабной матрицы. Значения безмасштабной матрицы умножаются на весовые значения:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A	0.090390	0.090390	0.090390	0.090390	0.090390	0.090390	0.090390
B	0.072312	0.072312	0.054234	0.054234	0.054234	0.054234	0.036156
C	0.090390	0.090390	0.054234	0.072312	0.072312	0.090390	0.072312
D	0.072312	0.072312	0.036156	0.072312	0.036156	0.036156	0.072312
E	0.072312	0.072312	0.036156	0.090390	0.036156	0.036156	0.054234
F	0.054234	0.054234	0.036156	0.054234	0.036156	0.054234	0.054234

4. Создание согласующейся группы. Все варианты численно попарно сравниваются в соответствующих столбцах. Показатели, в которых вариант K предпочтительнее варианта L , определяются согласующимся набором $A_{KL} = \{j | v_{Kj} \geq v_{Lj}\}$, остальные показатели определяются несогласующимся набором $A_{DL} = \{j | v_{Kj} < v_{Lj}\}$ (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Набор согласующихся и несогласующихся критериев

Если $AB \geq AC; C_1; 0$				Набор согласующихся критериев				Если $AB \geq AC; 0; C_1$				Набор несогласующихся критериев			
AB	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	AB	0	0	0	0	0	0	0
AC	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	AC	0	0	0	0	0	0	0
AD	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	AD	0	0	0	0	0	0	0
AE	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	AE	0	0	0	0	0	0	0
AF	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	AF	0	0	0	0	0	0	0
BA	0	0	0	0	0	0	0	BA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
BC	0	0	C3	0	0	0	0	BC	C1	C2	0	C4	C5	C6	C7
BD	C1	C2	C3	0	C5	C6	0	BD	0	0	0	C4	0	0	C7
BE	C1	C2	C3	0	C5	C6	0	BE	0	0	0	C4	0	0	C7
BF	C1	C2	C3	C4	C5	C6	0	BF	0	0	0	0	0	0	C7
CA	C1	C2	0	0	0	C6	0	CA	0	0	C3	C4	C5	0	C7
CB	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	CB	0	0	0	0	0	0	0
CD	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	CD	0	0	0	0	0	0	0
CE	C1	C2	C3	0	C5	C6	C7	CE	0	0	0	C4	0	0	0
CF	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	CF	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 3

Если $AB \geq AC; C_1; 0$				Набор согласующихся критериев				Если $AB \geq AC; 0; C_1$				Набор несогласующихся критериев			
<i>DA</i>	0	0	0	0	0	0	0	<i>DA</i>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
<i>DB</i>	C1	C2	0	C4	0	0	C7	<i>DB</i>	0	0	C3	0	C5	C6	0
<i>DC</i>	0	0	0	C4	0	0	C7	<i>DC</i>	C1	C2	C3	0	C5	C6	0
<i>DE</i>	C1	C2	C3	0	C5	C6	C7	<i>DE</i>	0	0	0	C4	0	0	0
<i>DF</i>	C1	C2	C3	C4	C5	0	C7	<i>DF</i>	0	0	0	0	0	C6	0
<i>EA</i>	0	0	0	C4	0	0	0	<i>EA</i>	C1	C2	C3	0	C5	C6	C7
<i>EB</i>	C1	C2	0	C4	0	0	C7	<i>EB</i>	0	0	C3	0	C5	C6	0
<i>EC</i>	0	0	0	C4	0	0	0	<i>EC</i>	C1	C2	C3	0	C5	C6	C7
<i>ED</i>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	0	<i>ED</i>	0	0	0	0	0	0	C7
<i>EF</i>	C1	C2	C3	C4	C5	0	C7	<i>EF</i>	0	0	0	0	0	C6	0
<i>FA</i>	0	0	0	0	0	0	0	<i>FA</i>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
<i>FB</i>	0	0	0	C4	0	C6	C7	<i>FB</i>	C1	C2	C3	0	C5	0	0
<i>FC</i>	0	0	0	0	0	0	0	<i>FC</i>	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
<i>FD</i>	0	0	C3	0	C5	C6	0	<i>FD</i>	C1	C2	0	C4	0	0	C7
<i>FE</i>	0	0	C3	0	C5	C6	C7	<i>FE</i>	C1	C2	0	C4	0	0	0

5. Создание согласующейся матрицы. В этой матрице отсутствуют элементы исходного диаметра, остальные элементы состоят из суммы коэффициентов значимости критериев согласующегося набора:

$$I_{KL} = \sum w_j, \quad I = [-I_{1,2} \quad I_{1,3} \quad \dots \quad I_{1,m} \quad I_{2,1} \quad I_{2,3} \quad \dots \quad I_{2,m} \quad \dots \quad I_{m,1} \quad I_{m,2} \quad \dots \quad I_{m(m-1)} - \dots].$$

Согласующаяся матрица имеет вид:

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>A</i>	*	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
<i>B</i>	0	*	0.088	0.695	0.695	0.833
<i>C</i>	0.519	0.999	*	0.999	0.861	0.999
<i>D</i>	0	0.657	0.304	*	0.861	0.833
<i>E</i>	0.138	0.657	0.138	0.833	*	0.833
<i>F</i>	0	0.470	0	0.342	0.508	*

6. Создание несогласующейся (обратной) матрицы. Данная матрица логически похожа на согласующуюся, с тем различием, что входящие величины получены из уравнения максимальных абсолютных значений ячейки. Столбец обратных критериев получен путем деления максимального абсолютного значения расхождений всех ячеек:

$$NI_{KL} = \frac{\max |v_{Kj} - v_{Lj}|, j \in D_{K,L}}{\max |v_{Kj} - v_{Lj}|, j \in A_{LL}},$$

$$NI = [-NI_{1,2} \quad NI_{1,3} \quad \dots \quad NI_{1,m} \quad NI_{2,1} \quad NI_{2,3} \quad \dots \quad NI_{2,m} \quad \dots \quad NI_{m,1} \quad NI_{m,2} \quad \dots \quad NI_{m(m-1)} - \dots].$$

Несогласующаяся матрица имеет вид:

	<u><i>A</i></u>	<u><i>B</i></u>	<u><i>C</i></u>	<u><i>D</i></u>	<u><i>E</i></u>	<u><i>F</i></u>
<i>A</i>	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>B</i>	1.00	*	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>C</i>	1.00	0.00	*	0.00	0.33	0.00
<i>D</i>	1.00	0.50	1.00	*	1.00	1.00
<i>E</i>	1.00	0.50	1.00	1.00	*	0.50
<i>F</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	*

7. Создание эффективной согласующейся матрицы. В согласующейся и несогласующейся матрицах варианты, имеющие предпочтительность менее порогового значения, становятся равными 0, оставшиеся — 1. Пороговое значение находится через соотношение

$$\underline{I} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{I_{k,l}}{m(m-1)}, \quad F_{KL} = \{1 \mid I_{KL} \geq \underline{I}; 0 \mid I_{KL} < \underline{I}\}.$$

При пороговом значении 0.608567 имеем эффективную согласующуюся матрицу:

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>A</i>	*	1	1	1	1	1
<i>B</i>	0	*	0	1	1	1
<i>C</i>	0	1	*	1	1	1
<i>D</i>	0	1	0	*	1	1
<i>E</i>	0	1	0	1	*	1
<i>F</i>	0	0	0	0	0	*

8. Создание эффективной несогласующейся матрицы:

$$\underline{NI} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{DI_{k,l}}{m(m-1)}, \quad G_{KL} = \{1, \text{ если } NI_{KL} \geq \underline{NI}; 0, \text{ если } NI_{KL} < \underline{NI}\}.$$

При обратном пороговом значении 0.6611, получаем эффективную несогласующуюся матрицу:

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>A</i>	*	1	1	1	1	1
<i>B</i>	0	*	0	0	0	0
<i>C</i>	0	1	*	1	1	1
<i>D</i>	0	1	0	*	0	0
<i>E</i>	0	1	0	0	*	1
<i>F</i>	0	0	0	0	0	*

9. Создание эффективной совокупной матрицы. Окончательная доминирующая матрица определяется произведением соответствующих ячеек эффективной согласующейся и несогласующейся матриц $H_{KL} = F_{KL} G_{KL}$ (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Эффективная совокупная матрица

Растение	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	Доминирующее значение
Клен трехлопастный	*	1	1	1	1	1	5
Дуб крупнопыльниковый	0	*	0	0	0	0	0
Ясень обыкновенный	0	1	*	1	1	1	4
Барбарис обыкновенный	0	1	0	*	0	0	1
Держидерево	0	1	0	0	*	1	2
Алыча	0	0	0	0	0	*	0
Недоминирующее значение	0	4	1	2	2	3	*

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор растения — наиболее существенный при планировании рекультивации земли. Он происходит согласно горным требованиям и различным критериям, включающим локальный ландшафт, сопротивляемость вредителям, способность роста растений, пригодность земли, экономические параметры, параметры защищенности почвы, способность водоудержания и предотвращение загрязнения. Методом PROMETHEE варианты расставлены в следующем порядке.

Ниже приведена матрица предпочтительности вариантов (ϕ^+ — выходящий поток, ϕ^- — входящий):

ϕ^+	<i>F</i>	<i>E</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	
4.338	0.999	0.861	0.999	0.48	0.999	0	<i>A</i>
1.213	0.529	0.342	0.342	0	0	0	<i>B</i>
3.466	0.999	0.861	0.695	0	0.911	0	<i>C</i>
1.127	0.657	0.166	0	0	0.304	0	<i>D</i>
1.071	0.491	0	0.138	0.138	0.304	0	<i>E</i>
0.498	0	0.166	0.166	0	0.166	0	<i>F</i>
	3.675	2.396	2.34	0.618	2.684	0	ϕ^-

Частичный рейтинг сформирован отдельной проверкой двух потоков $\phi^+(a)$ и $\phi^-(a)$ (рейтинг 1) [35]. Проблемы, возникающие при использовании данного подхода, представлены на рис. 1. При сравнении вариантов *D* и *B* подтвержденный поток *D* меньше, чем *B*, тогда как его отрицательные потоки также меньше, чем *B*. Данный метод не способен отчетливо показать приоритет варианта *B* или *D*.

1	<i>A</i>	3	<i>D</i>	5	<i>B</i>
Q^+	4.338	Q^+	1.127	Q^+	1.213
Q^-	0	Q^-	2.340	Q^-	2.684
2	<i>C</i>	4	<i>E</i>	6	<i>F</i>
Q^+	3.466	Q^+	1.074	Q^+	0.498
Q^-	0.618	Q^-	2.396	Q^-	3.675

Рис. 1. Частичное ранжирование методом PROMETHEE

Для полного ранжирования альтернатив необходимо описать результирующий ранжирующий поток к любому из вариантов (рейтинг 2). Это показано в табл. 5 и на рис. 2. Наилучший результирующий поток демонстрирует наиболее подходящий вариант [34].

ТАБЛИЦА 5. Потоки и окончательный рейтинг по методу PROMETHEE

Ранг	$\phi^+ - \phi^-$	ϕ^-	ϕ^+	Вариант
1	4.34	0	4.338	<i>A</i>
5	-1.47	2.684	1.213	<i>B</i>
2	2.85	0.618	3.466	<i>C</i>
3	-1.21	2.340	1.127	<i>D</i>
4	-1.33	2.396	1.071	<i>E</i>
6	-3.18	3.675	0.498	<i>F</i>

1	<i>A</i>	3	<i>D</i>	5	<i>B</i>
<i>Q</i>	4.34	<i>Q</i>	– 1.21	<i>Q</i>	– 1.47
2	<i>C</i>	4	<i>E</i>	6	<i>F</i>
<i>Q</i>	2.85	<i>Q</i>	– 1.33	<i>Q</i>	– 3.18

Рис. 2. Полное ранжирование методом PROMETHEE при выборе наиболее подходящего растения для восстановления почвы в районе медного карьера Сунгун

Окончательные баллы при выборе растения методом ELECTRE для восстановления земли в районе медного карьера Сунгун с различным количеством доминирующих и отклоненных вариантов: алыча — –3; держидерево — 0; барбарис обыкновенный — –1; ясень обыкновенный — 3; дуб крупнопольниковый — –4; клен трехлопастный — 5.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс выбора подходящего растения для восстановления почвы в районе медного карьера Сунгун. Выбор типа восстановления и подходящего растения — ключевой этап планирования и проектирования карьера. В ходе анализа применялся коэффициент значимости взвешивания критериев, а также результаты, полученные методом анализа иерархий.

Состояние почвы, содержание калия, фосфора и питательных веществ в карьере Сунгун находятся на приемлемом уровне, но требуется удобрение почвы. Для ее восстановления в качестве подходящих вариантов с точки зрения совместимости с условиями окружающей среды и возможности восстановления всей поврежденной площади рассмотрено несколько растений. Для выбора наиболее подходящего варианта использовались методы PROMETHEE и ELECTRE, результаты которых значительно не отличались друг от друга. Методом ELECTRE в порядке убывания приоритета получены следующие результаты: клен трехлопастный (5), ясень обыкновенный (3), держидерево (0), барбарис обыкновенный (–1), алыча (–3), дуб обыкновенный (–4), методом PROMETHEE — клен трехлопастный (4.34), ясень обыкновенный (2.85), барбарис обыкновенный (–1.21), держидерево (–1.33), дуб обыкновенный (1.47), алыча (–3.18). Наиболее предпочтительным вариантом для посадки растения оказался клен трехлопастный.

В настоящей работе рассмотрены технические аспекты, в дальнейшем следует провести исследование экономических аспектов и затрат на восстановление почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Favas P. J., Martino L. E., and Prasad M. N. Abandoned mine land reclamation — challenges and opportunities (holistic approach), In Bio-Geotechnologies for Mine Site Reclamation, 2018. — P. 3–31.
2. Ebrahimabadi A., Pouresmaeli M., Afradi A., Pouresmaeli E., and Nouri S. Comparing two methods of PROMETHEE and fuzzy TOPSIS in selecting the best plant species for the reclamation of Sarcheshmeh copper mine, Asian J. Water, Environment Pollut., 2018, Vol. 15, No. 2. — P. 141–152.
3. Rahmanpour M. and Osanloo M. A decision support system for determination of a sustainable pit limit, J. Cleaner Production, 2017, Vol. 141. — P. 1249–1258.
4. Soltanmohammadi H., Osanloo M., and Bazzazi A. A. An analytical approach with a reliable logic and a ranking policy for post-mining land-use determination, Land Use Policy, 2010, Vol. 27, No. 2. — P. 364–372.

5. **Damigos D.** Transformation of urban mining brownfields into green spaces and local housing market effects, *Italian J. Regional Sci.*, 2011, Vol. 10, No. 3. — P. 77–96.
6. **Šebelíková L., Řehouňková K., and Prach K.** Spontaneous revegetation vs. forestry Reclamation in post-mining sand pits, *Environmental Sci. Pollution Res.*, 2016, Vol. 23, No. 14. — P. 13598–13605.
7. **Osanloo M.** Mine reclamation, Amirkabir University of Technology Publication, Iran, 2018.
8. **Maiti S. K. and Ghose M. K.** Ecological restoration of acidic coalmine overburden dumps — an Indian case study, *Land Contamination and Reclamation*, 2005, Vol. 13, No. 4. — P. 361–369.
9. **Jordan F. L., Robin-Abbott M., Maier R. M., and Glenn E. P.** A comparison of chelator-facilitated metal uptake by a halophyte and a glycophyte, *Int. J. Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, Vol. 21, No. 12. — P. 2698–2704.
10. **Sheoran A. S., Sheoran V., and Poonia P.** Reclamation of mine degraded land by metallophytes, *J. Min. Eng.*, 2008, Vol. 10, No. 3. — P. 11–16.
11. **Ghose M. K.** Soil conservation for reclamation and revegetation of mine-degraded land, *TERI Informat. Digest on Energy and Environment*, 2005, Vol. 4, No. 2. — P. 137–150.
12. **Moreno-de Las Heras M., Nicolau J. M., and Espigares T.** Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment, *Ecological Eng.*, 2008, Vol. 34, No. 2. — P. 168–178.
13. **Maiti S. K., Karmakar N. C., and Sinha I. N.** Studies into some physical parameters aiding biological reclamation of mine spoil dump — a case study from Jharia coal field, *IME J.*, 2002, Vol. 41, No. 6. — P. 20–23.
14. **Daniels W. L. and Zipper C. E.** Creation and management of productive mine soils, *Powell River Project Reclamation Guide Lines for Surface-Mined Land in Southwest Virginia*, 1999.
15. **Singh A. N. and Singh J. S.** Experiments on ecological restoration of coal mine spoil using native trees in a dry tropical environment, *India: a synthesis, New forests*, 2006, Vol. 31, No. 1. — P. 25–39.
16. **Sheoran V., Sheoran A. S., and Poonia P.** Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review, *Int. J. Soil, Sediment Water*, 2010, Vol. 3, No. 2, Article 13.
17. **Brodie J.** Considerations in mine reclamation costing, *Brodie Consulting Ltd. West Vancouver, B. C.*, 2013.
18. **Akbari A. D., Osanloo M., and Hamidian H.** Selecting post mining land use through analytical hierarchy processing method: case study in Sungun copper open pit mine of Iran, In *Proc. of the fifteen Int. Symp. Mine Planning and Equipment Selection (MPES)*, Torino, Italy, 2006, Vol. 245. — 252 p.
19. **Koon D. L. and Graves D. H.** Cost analysis for several mulching systems used in surface-mine reclamation in eastern Kentucky, *Transportation Research Record*, 1981, Vol. 822. — P. 18–21.
20. **Alavi I. and Alinejad-Rokny H.** Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for plant types selection (case study: Reclamation plan of Sungun copper mine, Iran), *Australian J. Basic Appl. Sci.*, 2011, Vol. 5, No. 12. — P. 1104–1113.
21. **Alavi I., Akbari D. A., Ataei M., and Kiadaliri H.** A comparison Fuzzy TOPSIS method and Fuzzy AHP method for native plant type selection and implant (Case study: Sarcheshmeh copper mine), *Renewable Natural Resources Res.*, 2011, Vol. 2, No. 3.
22. **Nehring M. and Cheng X.** An investigation into the impact of mine closure and its associated cost on life of mine planning and resource recovery, *J. Cleaner Production*, 2016, Vol. 127. — P. 228–239.
23. **Paricheh M. and Osanloo M.** A simulation-based framework for estimating probable open-pit mine closure time and cost, *J. Cleaner Production*, 2017, Vol. 167. — P. 337–345.
24. **Amirshenava S. and Osanloo M.** Mine closure risk management: an integration of 3D risk model and MCDM techniques, *J. Cleaner Production*, 2018, Vol. 184. — P. 389–401.

25. **Bangian A. H. and Osanloo M.** Multi attribute decision model for plant types selection in mine reclamation plans: Case study Sungun copper mine, Post-Mining, 6–8 February, Nancy, France, 2008.
26. **Khan M. J. and Jones D. L.** Effect of composts, lime and diammonium phosphate on the phytoavailability of heavy metals in a copper mine tailing soil, *Pedosphere*, 2009, Vol. 19, No. 5. — P. 631–641.
27. **Mendez M. O. and Maier R. M.** Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments — an emerging remediation technology, *Environmental Health Perspectives*, 2008, Vol. 116, No. 3. — P. 278–283.
28. **Taherkhani Mahdi.** Application of TOPSIS technique in the spatial priority of the establishment of the agricultural transformation industry in rural areas, *Iranian J. Economic Res.*, 2007, Vol. 6, No. 3. — P. 59–73.
29. **Chou T. Y., Lin W. T., Lin C. Y., Chou W. C., and Huang P. H.** Application of the PROMETHEE technique to determine depression outlet location and flow direction in DEM, *J. Hydrology*, 2004, Vol. 287, No. 1–4. — P. 49–61.
30. **Osanloo M. and Parsaei M.** Sarcheshmeh copper mine reclamation, *Proc. of Safety, Health and Environment Congress in Mine and Mining Industries*, Kerman, Iran, 2004.
31. **Macharis C., Springael J., De Brucker K., and Verbeke A.** PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP, *European J. Operational Res.*, 2004, Vol. 153, No. 2. — P. 307–317.
32. **Safari H., Fagheyi M. S., Ahangari S. S., and Fathi M. R.** Applying PROMETHEE method based on entropy weight for supplier selection, *Business Management and Strategy*, 2012, Vol. 3, No. 1. — P. 97–106.
33. **Brans J. and Mareschal B.** PROMETHEE method cited at: multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer, New York, 2005.
34. **Omidi M., Razavi H., and Mahpeykar M. R.** Selection of project team members based on PROMETHEE method of effectiveness criteria, *J. Industrial Management Perspective*, 2011, No. 1. — P. 113–134.
35. **Benayoun R., Roy B., and Sussman N.** Manual de reference du programme electre, Note de Synthese et Formation, No. 25, Direction Scientifique SEMA, Paris, Franc, 1996.
36. **Sadeghiravesh M. H., Zehtabian Gh. R., and Khosravi H.** Application of AHP and ELECTRE method for evaluation of desertification alternatives, *Desert.ut.ac.ir.*, 2014, Vol. 19, No. 2. — P. 141–153.

Поступила в редакцию 09/II 2021

После доработки 20/III 2021

Принята к публикации 24/XII 2021