

УДК 622.271

**МУЛЬТИАТРИБУТНЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИТЫ
УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА “ДРМНО” ОТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

**Т. Шубаранович¹, С. Вуйич², М. Радосавлевич²,
Б. Димитриевич¹, С. Илич¹, Д. Ягодич-Крунич³**

¹*Горно-геологический факультет Белградского университета,
E-mail: tomislav.subaranovic@rgf.bg.ac.rs, ул. Джушина, 7, г. Белград, Сербия*

²*Белградский горный исследовательский институт,
ул. Батайнички пут, 2, г. Белград, Сербия*

³*Министерство горнодобывающей промышленности и энергетики Республики Сербия,
ул. Неманина, 22-26, г. Белград, Сербия*

Угольный карьер “Дрмно” является одним из основных производителей первичной энергии в компании “Электропривреда Сербии”. Ввиду непосредственной близости рек Млава и Дунай количество подземных вод в рабочей зоне карьера высокое, и защита от проникновения подземных вод важна для выполнения эксплуатационных работ. Выполнен мультиатрибутный анализ одного из двух проектных вариантов модификации системы защиты карьера “Дрмно” от проникновения подземных вод. Результаты анализа подтверждают целесообразность и обоснованность применения мультиатрибутного или многокритериального анализа при рассмотрении таких проблем.

Мультиатрибутный, многокритериальный анализ, угольный карьер “Дрмно”, защита карьера от подземных вод

DOI: 10.15372/FTPRPI20190213

Угольный карьер “Дрмно” относится к горно-энергетическому комплексу “Тепловые электростанции и карьеры Костолац”, работающему в рамках компании “Электропривреда Сербии”. Угольный разрез имеет годовой объем добычи 9 млн т угля и является источником первичной энергии для двух тепловых электростанций “Костолац А” и “Костолац Б” общей мощностью 921 МВт, с годовым объемом производства 5989 ГВт·ч, что составляет 17% всей электроэнергии, произведенной в Сербии. Меньшее количество угля используется для нужд народного хозяйства. Со строительством нового блока тепловых электростанций мощностью 350 МВт добыча угля в карьере “Дрмно” увеличится до 12 млн т/год [1–4].

Площадь горного отвода эксплуатационного поля на заключительной фазе работ в 2039 г. составит ~1800 га (рис. 1). Средний коэффициент вскрыши равен 3.83 м³/т, ежегодно извлекается около 34.5 млн м³ породы. Ширина рабочей зоны 2400–3350 м, годовое продвижение рабочей зоны с юга на север 176–194 м.



Рис. 1. Окончательная граница эксплуатационного поля угольного карьера “Дрмно”: 1 — р. Дунай; 2 — р. Млава; 3 — угольный карьер “Дрмно”; 4 — теплоэлектростанция “Костолац Б”; 5 — село Дрмно; 6 — внутренние отвалы; 7 — внешние отвалы

Под влиянием р. Млавы на западе и р. Дунай на севере рабочая зона угольного разреза сильно обводнена. Эффективность защиты от проникновения подземных вод — обязательное требование для выполнения горных работ. Вследствие подвигания рабочей зоны угольного карьера “Дрмно” на север, эксплуатационные работы приближаются к Дунаю и выполняются на большой глубине, поэтому защита от подземных вод становится более сложной. В результате исследований предложено два решения по защите угольного разреза от проникновения вод из рек Млава и Дунай. Одно из них основывается на концепции защиты с помощью системы водопоглощающих скважин и гидрозавесы, другое — на защите только системой водопоглощающих скважин. Преимущество решения защиты с помощью системы водопоглощающих скважин и гидрозавесы очевидно, но возникает вопрос о справедливости этих предпочтений в мультиатрибутной среде и в случае изменения условий затрат. Проверка выполнялась с помощью мультиатрибутного анализа по двум сценариям. Далее приведены краткие описания геологических и гидрогеологических характеристик рабочей зоны, концепции защиты карьера от проникновения подземных вод и сравнительный мультиатрибутный анализ с наблюдениями и оценками.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Угольные слои месторождения “Дрмно” относятся к эпохе верхнепонтийских отложений, а вмещающие породы представлены древесиной, гравием, песком, алевролитом и глиной толщиной до 120 м. Нижний основной угольный слой, разрабатываемый по всей рабочей зоне

горного отвода эксплуатационного поля, расположен на севере и северо-западе, кое-где проплаивается угольной глиной, угол падения 3–5 °С. Средняя толщина основного слоя угля составляет ~ 16 м, максимальная — 30–40 м (рис. 2).

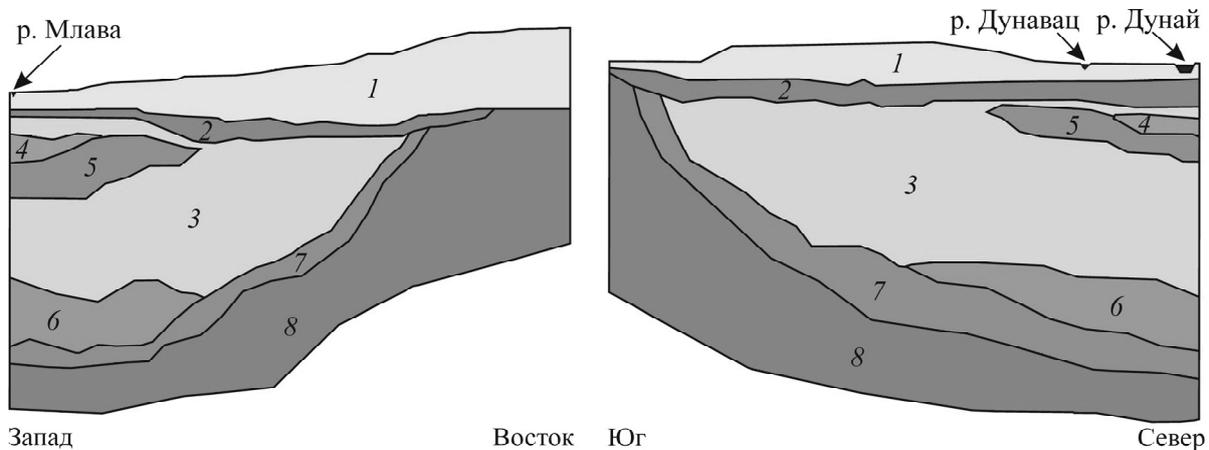


Рис. 2. Схематическое представление геологических профилей рабочей зоны угольного карьера “Дрмно”: 1 — аллювиальные и эоловые отложения; 2 — гравий; 3 — песок; 4 — глина; 5 — верхний угольный слой; 6 — мелкозернистая песчаная пыль; 7 — нижний основной слой угля; 8 — водонепроницаемые отложения

Рабочая зона угольного разреза “Дрмно” гидрогеологически сложна и составлена из коллекторских и изоляционных участков, а подземные воды гидравлически соединяются с водами рек Млава и Дунай. Гидрогеологическими изоляторами являются угольные пласты и коллекторы с мощностью: древесина — 2–15 м, гравий — 4–30 м, гравийный песок — до 2 м, песок и мелкозернистая песчаная пыль — до 100 м (рис. 2).

В гидрогеологических коллекторах существует несколько водоносных слоев, которые связаны или изолированы в зависимости от положения изолятора. Самый мощный слой образован гравием и песком. В естественных условиях это слой напорных вод, в условиях дренажной системы он становится безнапорным со свободным уровнем грунтовых вод. Коэффициент фильтрации слоя составляет $2.7 \cdot 10^{-7} - 1.8 \cdot 10^{-3}$ м/с, коэффициент водопроницаемости — $8.8 \cdot 10^{-9} - 1.1 \cdot 10^{-3}$ м²/с, а удельный выход — 0.04–0.22. Песчано-пылевой слой находится в прямой гидравлической связи с водной средой в гравии и песке. Коэффициент фильтрации составляет $1.4 \cdot 10^{-8} - 9.0 \cdot 10^{-6}$ м/с, коэффициент водопроницаемости — $4.2 \cdot 10^{-8} - 2.7 \cdot 10^{-5}$ м²/с, а удельный выход от 0.03 до 0.05.

Подземный водоносный слой в песчано-пылевых отложениях нижней части основного угольного пласта на глубине 90–100 м является напорным с давлением 5–8 бар и не имеет равномерного распределения. В зонах появления этого подземного водоносного слоя необходимо уменьшить давление воды из-за угрозы затопления угольного карьера и внутреннего отвала. Коэффициент фильтрации слоя $1.5 \cdot 10^{-6} - 1.9 \cdot 10^{-4}$ м/с, коэффициент водопроницаемости — $4.5 \cdot 10^{-6} - 9.5 \cdot 10^{-4}$ м²/с, удельный выход от 0.05 до 0.08.

На подземный водный режим напрямую влияют реки Млава, Дунай и рукав Дуная (Дунавац), который относится к системе каналов для защиты от высоких вод Дуная. Расход воды в р. Млава составляет от 0.7 м³/с в летний период и до 200 м³/с в начале весны. В зоне угольного карьера ширина Дуная ~ 1200 м, глубина 7–17 м, расход воды от 2000 до 8000 м³/с, а уро-

вень воды 69.5–70.0 м. В дунайском аллювиале на водный режим влияет сеть каналов с насосно-компрессорными станциями и плотинами для защиты береговой полосы от высоких вод Дуная, которые появляются вследствие работы гидроэлектростанции “Джердап”.

При открытии в 1985 г. угольного карьера “Дрмно” коэффициент дренажа рабочей зоны составлял 15 м³/т, в настоящее время он равен ~4 м³/т, что характеризует месторождение как месторождение с отличным дренажом.

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА ОТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Общая концепция защиты угольного карьера “Дрмно” от проникновения вод из бассейнов рек Млава и Дунай основана на системе водопоглощающих скважин и гидрозавесы. Водопоглощающие скважины расположены по контуру передней части рабочей зоны, 11 линий до контура завершения работ на карьере в 2039 г. и линии водопоглощающих скважин вдоль западной границы (рис. 3). Линии водопоглощающих скважин перед рабочей зоной функционировали в течение 5 лет, прежде чем рабочая зона расширилась до них. Работали две линии водопоглощающих скважин, расположенных перед рабочей зоной. Из-за поворота фронта разработки в центральной части расстояние между линиями на западной стороне составило ~320 м, на востоке ~500 м. Когда продвижение перешло в параллельное, расстояние между линиями составило 500 м. Количество водопоглощающих скважин на линии 40–45, их глубина от 10 до 144 м. Для предотвращения притока подземных вод из гравийно-песчаных аллювиалей Дуная и Млавы планируется установка гидрозавесы вдоль западной и северной границ угольного карьера протяженностью 7.7 км, где расстояние от поверхности карьера равно 150 м, с вклиниванием на 1 м в нижнюю часть гравийно-песчаных отложений на глубину от 16 до 29 м (рис. 3).

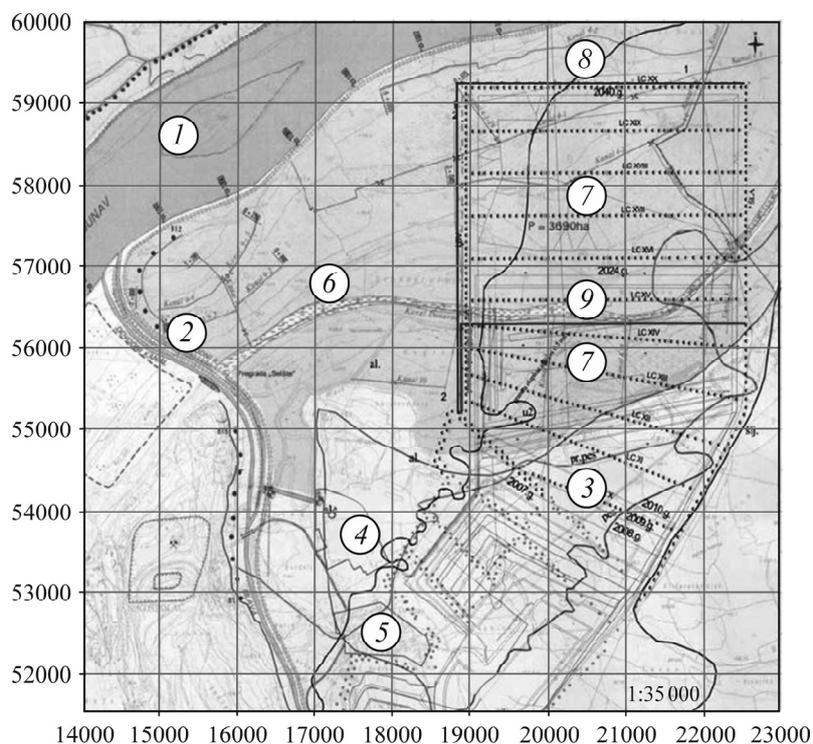


Рис. 3. Схема системы защиты угольного карьера “Дрмно” от вод из рек Млавы и Дуная: 1 — р. Дунай; 2 — р. Млава; 3 — угольный карьер “Дрмно”; 4 — теплоэлектростанция “Костолац Б”; 5 — село Дрмно; 6 — Дувац; 7 — линии водопоглощающих скважин; 8 — гидрозавеса, базовое решение; 9 — гидрозавеса, переходное решение (вариант А)

Расширение угольного карьера к рукаву Дуная (Дунавцу) сопровождается быстрым увеличением глубины горных работ, что требует некоторой модификации дренажной системы, т. е. корректировки основной системы защиты угольного разреза от грунтовых вод в этой зоне. При анализе условий и требований защиты предложено два корректировочных решения. Согласно одному, защита основывается на системе водопоглощающих скважин и создании гидрозавесы перед Дунавцом (вариант А), а согласно другому — только на системе водопоглощающих скважин (вариант В).

По варианту А длина гидрозавесы равна 4412 м, глубина 14–34 м (в среднем 24 м), продольная поверхность водосборной канавы 103 916.81 м², ширина уреза гидрозавесы 1.1 м, объем 114.308 м³. В качестве наполнителя гидрозавесы предусмотрена бетонная смесь. В дополнение к созданию гидрозавесы в системе также имеются три линии дренажа с 97 водопоглощающими скважинами. Диаметр бурения колодца составляет 1100 мм до глубины 6 м с установкой обсадной колонны диаметром 1080 мм, при дальнейшем увеличении глубины диаметр бурения равен 820 мм. Для принятия и гравитационного отвода воды из водопоглощающих скважин предусмотрены трубопроводы вдоль каждой линии водопоглощающих скважин. По варианту В до подхода рабочей зоны угольного разреза к Дунавцу необходимо построить 5 линий с 217 водопоглощающими скважинами такой же конструкции, как и в варианте А.

МУЛЬТИАТРИБУТНЫЙ АНАЛИЗ

После предварительного анализа рассмотрены факторы, которые существенно влияют на защиту угольного разреза “Дрмно” от подземных вод. Методом математического моделирования дана оценка гидродинамики подземных вод во взаимодействии с расширением границ угольного карьера и рассмотрены особенности системы защиты от грунтовых вод для обоих решений [5]:

- вариант А с использованием гидрозавесы и водопоглощающих скважин;
- вариант В, где предложена только система водопоглощающих скважин.

Тестовые расчеты подтвердили удовлетворительную эффективность обоих вариантов. Чтобы принять решение о принятии того или иного варианта, в соответствии с которым будет строиться система защиты от подземных вод, проведен их сравнительный анализ, который уже на первом этапе на основании затрат на строительство и динамики инвестиционных вложений показал преимущество варианта А. Независимо от важности и значимости этих двух атрибутов, возникает вопрос, достаточно ли этого для принятия окончательного решения? Сделан вывод, что анализ вариантов должен включать и другие соответствующие атрибуты. Команда экспертов оценила, что 9 атрибутов являются значимыми для оценки модифицированных решений — вариантов защиты угольного карьера “Дрмно” от подземных вод.

Список выбранных атрибутов и их особенности приведены в табл. 1. Из 9 атрибутов пять количественного типа (А₂, А₄, А₅, А₆, А₇) и четыре качественного (А₁, А₃, А₈, А₉). При оценке качественных атрибутов использовалась шкала от 1 до 10, по которой оценка 1 соответствует эквиваленту “плохо” (“низший балл”), а оценка 10 — эквиваленту “отлично” (“высший балл”). Для количественных типов применен обычный диапазон значений атрибутов от 0.05 до 1.00, а их значения для объективности оценки определены общим решением экспертов (табл. 1).

После анализа натуральных условий и возможных последствий, которые отразились бы на продлении сроков строительства системы защиты угольного карьера “Дрмно” от подземных вод, установлено, что при варианте А возможны два сценария. Согласно первому, строительство системы защиты с помощью гидрозавесы может быть закончено в запланированное время. Согласно второму, из-за возможных проблем и осложнений, связанных с договоренностью о выплатах за использование земель, которые не принадлежат угольному разрезу, строительство гидрозавесы может продолжаться дольше запланированного времени, что увеличит затраты на строительство и динамику инвестиционных вложений.

ТАБЛИЦА 1. Список атрибутов и отправных параметров для мультиатрибутного анализа

Атрибут	Характеристика атрибутов		Сценарий I		Сценарий IIа, (A ₂ , A ₃)↑ + 30 %		Сценарий IIб, (A ₂ , A ₃)↑ + 50 %		Замечание
	Тип	Вес	A	B	A	B	A	B	
Использование и деградация сельскохозяйственных земель, A ₁ , yr	T ₂	0.40	9.00	3.00	9.00	3.00	9.00	3.00	
Расходы на строительство системы, A ₂ , €	T ₁	1.00	15.31	22.39	19.90	22.39	22.97	22.39	val · 10 ⁶
Динамика инвестиционных вложений, A ₃ , yr	T ₂	0.70	6.00	2.00	7.80	2.00	9.00	2.00	
Количество выкаченной воды на 1 т угля, A ₄ , м ³ /т	T ₁	0.75	3.00	4.50	3.00	4.50	3.00	4.50	
Количество работников, занятых обслуживанием системы, A ₅ , чел.	T ₁	0.15	14.00	21.00	14.00	21.00	14.00	21.00	
Годовое потребление электроэнергии, A ₆ , кВт	T ₁	0.75	67.98	148.90	67.98	148.90	67.98	148.90	val · 10 ⁶
Ежегодные расходы на техническое обслуживание оборудования системы, A ₇ , €	T ₁	0.50	1.10	2.90	1.10	2.90	1.10	2.90	val · 10 ⁶
Влияние работы системы на уровень подземных вод в окружающей среде с точки зрения сельского хозяйства, лесного хозяйства и водоснабжения, A ₈ , €	T ₁	0.95	9.42	19.17	9.42	19.17	9.42	19.17	val · 10 ⁵
Надежность системы с точки зрения проблем в работе оборудования, A ₉ , yr	T ₂	0.70	2.00	6.00	2.00	6.00	2.00	6.00	

Примечание. Цель атрибутов — min; A, B — варианты решений по защите от подземных вод; T₁ — количественный тип; T₂ — качественный тип; yr — вербальная переменная; val — значение

В соответствии со сценарием пролонгированного времени строительства предусмотрено два варианта. По первому пролонгированное время строительства гидрозавесы увеличит затраты на строительство на 30 % (сценарий IIа), по второму — на 50 % (сценарий IIб). Учитывая, что определяющими показателями затрат на строительство и динамику инвестиционных вложений в модели являются атрибуты A₂ и A₃ (соответственно 1.0 и 0.7), высказано предположение, что анализ изменения значений этих атрибутов может повлиять на предпочтение варианта А.

При рассмотрении интегрального влияния всех 9 атрибутов применен многопараметрический анализ по двум сценариям. В сценарии I входные параметры многопараметрической модели сформированы на основе предположений, исследований, проектных расчетов и спецификаций. В сценарии II значения A₁, A₄, A₅, A₆, A₇, A₈ и A₉ постоянны, поскольку пролонгация времени строительства не оказывает на них существенного влияния, а переменными являются атрибуты A₂ и A₃. В качестве контрольных показателей принято увеличение затрат на 30 % (сценарий IIа) и на 50 % (сценарий IIб) (табл. 1).

В процедуре сравнительного многопараметрического анализа вариантов А и В защиты угольного карьера от подземных вод применялся метод Promethee, как наиболее удачный при сравнении. В табл. 2, 3 интегрально представлены параметры предпочтений, значения параметров и конечные результаты многокритериального анализа по методу Promethee.

ТАБЛИЦА 2. Предпочтения и оценка альтернатив

Параметр		Атрибуты								
		A ₁ , вр	A ₂ , €	A ₃ , вр	A ₄ , м ³ /т	A ₅ , чел.	A ₆ , кВт	A ₇ , €	A ₈ , вр	A ₉ , вр
Предпочтения	Цель (min / max)	min	min	min	min	min	min	min	min	max
	Вес	0.40	1.00	0.70	0.75	0.15	0.75	0.50	0.70	0.20
	Функция предпочтения	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin	Lin
	Границы	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
	индифферентность Q	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	предпочтение P	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Оценка										
Сценарий I	Минимальное значение	3.00	15.31	3.00	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	2.50
	Максимальное значение	9.00	22.39	9.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	4.00
	Среднее значение	6.00	18.85	6.00	3.75	17.50	108.44	2.00	4.00	3.25
	Стандартное отклонение	3.00	3.54	3.00	0.75	3.50	40.46	0.90	2.00	0.75
	Решение А	9.00	15.31	6.00	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	4.00
	Решение В	3.00	22.39	2.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	2.50
Сценарий II _a , (A ₂ , A ₃)↑ + 30%	Минимальное значение	3.00	19.90	3.00	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	2.50
	Максимальное значение	9.00	22.39	9.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	4.00
	Среднее значение	6.00	21.14	6.00	3.75	17.50	108.44	2.00	4.00	3.25
	Стандартное отклонение	3.00	1.25	3.00	0.75	3.50	40.46	0.90	2.00	0.75
	Решение А	9.00	19.90	7.80	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	4.00
	Решение В	3.00	22.39	2.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	2.50
Сценарий II _б , (A ₂ , A ₃)↑ + 50%	Минимальное значение	3.00	22.39	3.00	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	2.50
	Максимальное значение	9.00	22.97	9.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	4.00
	Среднее значение	6.00	22.68	6.00	3.75	17.50	108.44	2.00	4.00	3.25
	Стандартное отклонение	3.00	0.29	3.00	0.75	3.50	40.46	0.90	2.00	0.75
	Решение А	9.00	22.97	9.00	3.00	14.00	67.98	1.10	2.00	4.00
	Решение В	3.00	22.39	2.00	4.50	21.00	148.90	2.90	6.00	2.50

Примечание. вр — вербальная переменная; Lin — линейная функция; Abs — абсолютная (предельная)

Результаты анализа (табл. 3) показали, что порядок альтернативы, в которой вариант А является предпочтительным, не чувствителен к влиянию увеличения динамики инвестиций и затрат на строительство на 30%. Когда затраты увеличиваются на 50%, предпочтение варианта А остается, но с преимуществом, уменьшенным на 33.31%. Это свидетельствует о том, что превышение времени и затрат на строительство гидрозавесы может поставить под сомнение предпочтение варианта А системы защиты угольного карьера “Дрмно” от проникновения подземных вод из рек Млава и Дунай.

ТАБЛИЦА 3. Результаты анализа вариантов А и В

Сценарий	Решение	Ф	Ф+	Ф-	Предпочтение
I	A	0.4612	0.6748	0.2136	←
	B	-0.4612	0.2136	0.6748	
II _a	A	0.4612	0.6748	0.2136	←
	B	-0.4612	0.2136	0.6748	
II _б	A	0.1864	0.4500	0.2636	←
	B	-0.1864	0.2636	0.4500	

ВЫВОДЫ

Проблема защиты угольного карьера “Дрмно” от проникновения подземных вод рек Млава и Дунай сложная и многомерная. Основное внимание уделено проверке степени предпочтения одной из двух проектных концепций системы защиты. Первый сравнительный анализ двух вариантов системы защиты от подземных вод выявил предпочтение варианта, в котором предложено использование гидрозавесы и водопоглощающих скважин. Мультиатрибутное сравнение вариантов показало, что это предпочтение не является безусловным, оно изменяется вследствие продолжительности построения системы, которая зависит от внешних факторов. Это подтверждает необходимость применения мультиатрибутного или многокритериального анализа при решении подобных проблем и дилемм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дражович Д.** Дополнительный проект завершения строительства угольного разреза “Дрмно” мощностью 6.5 млн т угля в год. — Белград: Горн. ин-т, 2004. — 175 с.
2. **Павлович В.** Изучение техникоэкономического анализа строительства гидрозавесы на угольном разрезе “Дрмно”. — Белград: Белградский ун-т, 2006. — 150 с.
3. **Šubaranović T. and Janković I.** Analysis of the dewatering process of opencast mines, *Bulletin of Mines, Mining Institute Belgrade & Academy of Engineering Sciences of Serbia*, 2017, Vol. CXIV, No. 1–2. — P. 39–45.
4. **Dimitrijević B., Vujić S., Matić I., Marjanac S., Praštalo Ž., Radosavljević M., and Čolaković V.** Multi-criterion analysis of land reclamation methods at Klenovnik open pit mine, Kostolac coal basin, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 319–325.
5. **Matos P. V., Cardadeiro E., Silva J. A., and Muylder C. F.** The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal, *RAUSP Management J.*, 2018, Vol. 53, No. 2. — P. 214–224.

Поступила в редакцию 23/VIII 2018

После доработки 23/VIII 2018

Принята к публикации 26/III 2019