

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 4 / 2026, Vol. 18, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/03SAVN426.pdf>

DOI: 10.15862/03SAVN426 (<https://doi.org/10.15862/03SAVN426>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Маций, В. С. Инженерная защита здания школы многокритериальным анализом с вето / В. С. Маций // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/03SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/03SAVN426.

For citation:

Matsiy V.S. Engineering protection of a school building using multi-criteria outranking analysis with veto. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(4): 03SAVN426. Available at: <https://esj.today/PDF/03SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/03SAVN426. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.131.6:518.8

Маций Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», Краснодар, Россия

Аспирант

E-mail: matsiy02@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0710-331X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1120320

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201343171>

Инженерная защита здания школы многокритериальным анализом с вето

Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача выбора оптимальных мероприятий инженерной защиты участка строительства школы, расположенного в сложных инженерно-геологических условиях г. Сочи. Участок характеризуется значительными уклонами рельефа, развитием оползневых процессов, обводнением грунтового массива и близостью к особо охраняемой природной территории — Национальному парку. Автором обосновано, что традиционный подход на минимизации сметной стоимости не позволяет в полной мере учесть весь комплекс требований к объекту, включая экологические ограничения, конструктивную надежность и долговечность сооружений. В качестве альтернативных решений в статье рассмотрены: для противооползневой защиты верхового склона — свайные сооружения из буронабивных свай, объединенных ростверком, и свайно-анкерные системы с дополнительными анкерными элементами; для водопонижения на период строительства — противодиффузионная завеса из бурсекущихся глиноцементобетонных (ГЦБ) свай и шпунтовое ограждение из стальных свай Ларсен Л4; для водопонижения в период эксплуатации — пластовый дренаж из инертных материалов с обратным фильтром и система лучевых дренажей, объединенных водоприемными колодцами. Автором выполнен сравнительный анализ альтернатив с использованием многокритериальных методов превосходства с вето (ELECTRE I и ELECTRE III), которые позволяют учитывать жесткие ограничения по экологическим и геотехническим факторам. Оценка производилась по пяти критериям: стоимость строительства и эксплуатации, трудоемкость выполнения строительно-монтажных работ, воздействие на окружающую среду, конструктивная и эксплуатационная надежность, а также расчетный срок службы сооружений. Полученные результаты демонстрируют, что применение многокритериального анализа позволяет обоснованно выбрать комплекс мероприятий, обеспечивающих безопасность объекта при соблюдении экологических требований и экономической целесообразности. Установлено, что все три подзадачи имеют согласованные решения, подтвержденные несколькими методами.

Ключевые слова: выбор мероприятий инженерной защиты; многокритериальные методы анализа с вето

Введение

Строительная площадка школы в г. Сочи характеризуется наличием оползневых процессов в верховой части склона, активизировавшихся под влиянием крутых уклонов поверхности (рис. 1, 2). В процессе выполнения подрезки при устройстве ограждения произошло смещение грунтовой массы, что привело к падению деревьев. Учитывая расположение объекта в зоне особо охраняемой природной территории (Национальный парк), все строительные операции по возведению подпорных сооружений должны выполняться с применением временного ограждения; подрезка склона без защитных мероприятий исключена.



Рисунок 1. Смещения грунта, спровоцированные подрезкой склона в период устройства ограждения (фото автора)

В практике проектирования выбор вариантов инженерной защиты нередко сводится к сравнению технико-экономических показателей, причем решающую роль играет сметная стоимость. Однако подобный упрощенный подход не позволяет в должной мере учесть весь спектр требований, включая трудоемкость, экологичность, надежность и долговечность. В связи с этим для обоснованного выбора необходимо использовать инструментарий многокритериального анализа (МКА) [1] как, например, при выборе противооползневых сооружений [2] или свайных фундаментов [3]. В области геотехники наиболее востребованными являются метод анализа иерархий (АНП), который применяется для оценки устойчивости

склонов [4; 5], насыпей [6], расчете удерживающих сооружений [7], при оценке риска [8; 9] и картировании [10; 11]. В инженерной защите от сложных геологических процессов использовались серый реляционный анализ [12] и методы с вето (*ELECTRE*) [13; 14].



Рисунок 2. Оползневая активность по бортам ручьев (фото автора)

Целью настоящего исследования является обоснование и выбор наиболее рациональных мероприятий по инженерной защите здания школы, расположенного в сложных геологических условиях, на всех этапах его жизненного цикла — от строительства до эксплуатации. Достижение этой цели требует последовательного решения трех основных задач: всестороннего анализа инженерно-геологических условий участка строительства; формирования перечня альтернативных конструктивных решений и обоснования критериев их оценки; применения многокритериального подхода с вето (*ELECTRE I* и *ELECTRE III*) для выбора наилучших вариантов.

Инженерно-геологические условия

По результатам обследования строительной площадки установлено наличие трех типов опасных геологических процессов: обводнение пород, оползневые деформации и эрозия русел временных водотоков. Их пространственное распространение показано на схеме. Верховой склон, примыкающий к площадке, обладает значительной крутизной и интенсивным водопритокком. Оползни приурочены к крутым склонам и местам выхода водотоков; они проявляются главным образом в виде смещения поверхностных отложений по подстилающим коренным породам.

На участке также развиты экзогенные процессы. Плоскостной смыв наблюдается на участках круче 15° , лишенных почвенного слоя и растительности; его интенсивность зависит от литологии. При интенсивных дождях формируется плоскостной сток, удаляющий продукты выветривания. В северо-западной и западной частях территории в период изысканий фиксировались активные склоновые деформации, связанные с перемещением покровных четвертичных отложений и охватывающие как склоновые, так и подсклоновые поверхности. Угроза подтопления фундаментов обусловлена высоким уровнем подземных вод и катастрофическими паводками на р. Магеста в периоды затяжных ливней. Поэтому проектом вертикальной планировки необходимо предусмотреть защиту заглубленных помещений (цокольный этаж, подвалы) как от паводкового затопления, так и от кратковременных подъемов уровня грунтовых вод.

С геологической точки зрения территория является сложной, что требует выполнения мероприятий по инженерной защите в соответствии с СП 116.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 22-02-2003). Основные задачи защиты — выбор типа противооползневых сооружений и систем водопонижения для периодов строительства и эксплуатации.

Постановка задачи

В рамках решения задачи инженерной защиты площадки строительства школы рассматриваются три группы альтернатив, соответствующих основным функциональным элементам системы защиты: удерживающие сооружения на верховом склоне, водопонижение в период строительства и водопонижение в период эксплуатации.

Подзадача А. Противооползневые сооружения.

Для удержания подрезки и насыпи на верховом склоне рассматриваются два типа конструкций:

- A_1 — свайное противооползневое сооружение, традиционно применяемое в практике геотехнического строительства [15], представляющее собой один или два ряда буронабивных свай, объединенных ростверком.
- A_2 — свайно-анкерное сооружение, относящееся к более современным техническим решениям [16], включающее один или два ряда буронабивных свай с дополнительными анкерными элементами.

Подзадача Б. Водопонижение на период строительства.

На этапе возведения котлована предусмотрены следующие альтернативные решения:

- B_1 — противофильтрационная завеса, устраиваемая из буросекущихся глиноцементобетонных (ГЦБ) свай диаметром 620 мм;
- B_2 — шпунтовое ограждение из стальных свай Ларсен Л4.

Подзадача В. Водопонижение на период эксплуатации.

Для обеспечения долговременной защиты заглубленных помещений от подтопления рассматриваются:

- B_1 — пластовый дренаж мощностью 1,0 м, выполненный из инертных материалов различных фракций с устройством обратного фильтра, предотвращающего суффозию и заиливание;
- B_2 — система лучевых дренажей, объединенных в водоприемные колодцы.

Таким образом, задача многокритериального выбора формулируется как определение наилучшей комбинации альтернатив A_i, B_j, C_k из множества $\{A_1, A_2\} \times \{B_1, B_2\} \times \{C_1, C_2\}$.

Оценка альтернатив производится по пяти критериям, отражающим технические, экономические и экологические аспекты проектных решений: стоимость (млн руб.), трудоемкость (качественная оценка), экологичность, надежность и долговечность.

По подзадаче А:

- стоимость: $C_{A1} = 777$ млн руб., $C_{A2} = 961$ млн руб.;
- трудоемкость: для A_1 — ниже (отсутствие анкерных работ);
- экологичность: A_1 предпочтительнее (анкеры A_2 пересекают границу Национального парка);
- надежность: A_2 выше;
- долговечность: A_1 незначительно выше.

По подзадаче Б:

- стоимость: $C_{B1} = 1760$ млн руб., $C_{B2} = 1833$ млн руб.;
- трудоемкость: B_1 выше (требуется разбуривание ГЦБ по секциям для исключения барражного эффекта), однако демонтаж B_1 при прокладке коммуникаций проще;
- экологичность: B_2 предпочтительнее (меньший объем буровых работ);
- надежность: B_1 незначительно выше;
- долговечность: B_1 незначительно выше.

По подзадаче В:

- стоимость: $C_{B1} = 146$ млн руб., $C_{B2} = 34$ млн руб.;
- трудоемкость: B_1 ниже;
- экологичность: B_1 несколько выше;
- надежность: B_1 выше (обеспечивает равномерное распределение порового давления);
- долговечность: B_1 выше.

**Выбор мероприятий инженерной защиты объекта:
«Дошкольная образовательная организация на 300 мест в г. Сочи»
многокритериальным анализом методом ELECTRE I**

Многокритериальный анализ с вето (*ELECTRE I*, III или их нечеткие аналоги) позволяет учесть ситуацию, когда один или несколько критериев имеют право блокировать альтернативу, даже если по сумме она лучше.

В нашей задаче это особенно актуально для:

- Экологичность в подзадаче А — анкера заходят на территорию Национального парка (жесткое ограничение).
- Надежность в подзадаче В — неравномерность порового давления может привести к аварии.

Общий алгоритм многокритериального анализа с вето (*ELECTRE I*) [17; 18]

1. Нормализация матрицы решений.

Минимизация:

$$N_{ij} = \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}, \quad (1)$$

где:

i — индекс альтернативы;

j — индекс критерия;

$\max_j x_{ij}$ и $\min_j x_{ij}$ — максимум и минимум по критерию.

Максимизация:

$$N_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}. \quad (2)$$

2. Задание весов критериев w_k .

3. Расчет индекса согласия $C(A_p, A_q)$:

$$C(A_p, A_q) = \frac{\sum_{k \in \text{согласие}} w_k}{\sum_{k=1}^n w_k}, \quad (3)$$

где:

«согласие» — критерии, по которым A_p не хуже A_q .

4. Расчет индекса несогласия $D(A_p, A_q)$:

$$D(A_p, A_q) = \max_{k \in \text{несогласие}} \frac{x_{qk} - x_{pk}}{x_{\max k} - x_{\min k}}, \quad (4)$$

где:

x_{qk} — значение альтернативы A_q по критерию k ;

x_{pk} — значение альтернативы A_p по критерию k .

5. Порог вето ν_k — если по критерию k разница превышает ν_k , альтернатива A_p не может доминировать над A_q , даже при высоком согласии.

6. Построение отношения превосходства:

$$C \geq c_0, D \leq d_0, \forall k : \Delta_k \leq \nu_k \Rightarrow A_p \succ A_q, \quad (7)$$

где:

c_0 и d_0 — пороги согласия и несогласия, соответственно;

$\forall k$ — проверка выполняется по каждому критерию;

Δ_k — разность по критерию k ;

ν_k — порог вето по критерию k .

Подзадача А (A_1 или A_2)

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
A_1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00
A_2	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,20, \quad w_T = 0,10, \quad w_E = 0,25, \quad w_R = 0,35, \quad w_D = 0,10.$$

Расчет $C(A_1, A_2)$:

Шаг 1: Определяем, по каким критериям A_1 не хуже A_2 :

$$\begin{aligned}C: N_{A_1,C} = 1,00 \geq N_{A_2,C} = 0,00 &\Rightarrow \text{согласие} \\T: N_{A_1,T} = 1,00 \geq N_{A_2,T} = 0,00 &\Rightarrow \text{согласие} \\E: N_{A_1,E} = 1,00 \geq N_{A_2,E} = 0,00 &\Rightarrow \text{согласие} \\R: N_{A_1,R} = 0,00 < N_{A_2,R} = 1,00 &\Rightarrow \text{НЕ согласие} \\D: N_{A_1,D} = 1,00 \geq N_{A_2,D} = 0,00 &\Rightarrow \text{согласие}\end{aligned}$$

Шаг 2: Сумма весов критериев согласия:

$$\sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_C + w_T + w_E + w_D = 0,20 + 0,10 + 0,25 + 0,10 = 0,65.$$

Шаг 3: Индекс согласия: $C(A_1, A_2) = \frac{0,65}{1,00} = 0,65.$

Расчет $D(A_1, A_2)$:

Шаг 1: Определяем критерии, по которым A_1 хуже A_2 (несогласие):

$$R: N_{A_2,R} - N_{A_1,R} = 1,00 - 0,00 = 1,00.$$

Шаг 2: Размах по критерию R : $x_{\max,R} - x_{\min,R} = 1,00 - 0,00 = 1,00.$

Шаг 3: Индекс несогласия: $D(A_1, A_2) = \max\left(\frac{1,00}{1,00}\right) = 1,00.$

Проверка условия превосходства $A_1 > A_2$:

$$C(A_1, A_2) = 0,65 \geq c_0 = 0,60;$$

$$D(A_1, A_2) = 1,00 \leq d_0 = 0,40 \quad - \text{НЕТ!}$$

Условие 2 не выполнено $\rightarrow A_1$ не превосходит A_2 .

Расчет $C(A_2, A_1)$:

Шаг 1: По каким критериям A_2 не хуже A_1 :

$$C: N_{A_2,C} = 0,00 < N_{A_1,C} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$T: N_{A_2,T} = 0,00 < N_{A_1,T} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$E: N_{A_2,E} = 0,00 < N_{A_1,E} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$R: N_{A_2,R} = 1,00 \geq N_{A_1,R} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

$$D: N_{A_2,D} = 0,00 < N_{A_1,D} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

Шаг 2: Сумма весов согласия: $\sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_R = 0,35.$

Шаг 3: Индекс согласия: $C(A_2, A_1) = \frac{0,35}{1,00} = 0,35.$

Проверка условия превосходства $A_2 > A_1$:

$$C(A_2, A_1) = 0,35 \geq c_0 = 0,60 \quad - \text{НЕТ!}$$

Условие 1 не выполнено $\rightarrow A_2$ не превосходит A_1 .

Применение вето по экологии: Порог вето: $v_E = 0,20.$

$$\text{Проверка для } A_2 > A_1: \frac{x_{A_1,E} - x_{A_2,E}}{x_{\max,E} - x_{\min,E}} = \frac{1,00 - 0,00}{1,00} = 1,00.$$

$$1,00 > v_E = 0,20 \Rightarrow \text{ВЕТО!}$$

Вывод: A_2 не может доминировать над A_1 из-за недопустимого ухудшения экологии.
Итоговое решение по подзадаче A :

- $A_1 \not> A_2$ (из-за высокого несогласия по надежности);
- $A_2 \not> A_1$ (из-за вето по экологии).

ELECTRE I рекомендует A_1 .

Подзадача Б (B_1 или B_2)

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
B_1	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00
B_2	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,30, \quad w_T = 0,25, \quad w_E = 0,20, \quad w_R = 0,15, \quad w_D = 0,10.$$

Расчет $C(B_1, B_2)$:

Шаг 1: По каким критериям B_1 не хуже B_2 :

$$\begin{aligned} C: N_{B_1,C} = 1,00 &\geq N_{B_2,C} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие} \\ T: N_{B_1,T} = 0,00 &< N_{B_2,T} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие} \\ E: N_{B_1,E} = 0,00 &< N_{B_2,E} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие} \\ R: N_{B_1,R} = 1,00 &\geq N_{B_2,R} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие} \\ D: N_{B_1,D} = 1,00 &\geq N_{B_2,D} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие} \end{aligned}$$

Шаг 2: Сумма весов согласия:

$$\sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_C + w_R + w_D = 0,30 + 0,15 + 0,10 = 0,55.$$

$$\text{Шаг 3: Индекс согласия: } C(B_1, B_2) = \frac{0,55}{1,00} = 0,55.$$

Расчет $D(B_1, B_2)$:

Шаг 1: Критерии несогласия (B_1 хуже B_2):

$$\begin{aligned} T: N_{B_2,T} - N_{B_1,T} &= 1,00 - 0,00 = 1,00; \\ E: N_{B_2,E} - N_{B_1,E} &= 1,00 - 0,00 = 1,00. \end{aligned}$$

Шаг 2: Размах по каждому критерию:

$$\begin{aligned} x_{\max,T} - x_{\min,T} &= 1,00 - 0,00 = 1,00; \\ x_{\max,E} - x_{\min,E} &= 1,00 - 0,00 = 1,00. \end{aligned}$$

Шаг 3: Индекс несогласия: $D(B_1, B_2) = \max\left(\frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}\right) = 1,00$.

Расчет $C(B_2, B_1)$:

Шаг 1: По каким критериям B_2 не хуже B_1 :

$C: N_{B_2,C} = 0,00 < N_{B_1,C} = 1,00 \Rightarrow$ НЕ согласие

$T: N_{B_2,T} = 1,00 \geq N_{B_1,T} = 0,00 \Rightarrow$ согласие

$E: N_{B_2,E} = 1,00 \geq N_{B_1,E} = 0,00 \Rightarrow$ согласие

$R: N_{B_2,R} = 0,00 < N_{B_1,R} = 1,00 \Rightarrow$ НЕ согласие

$D: N_{B_2,D} = 0,00 < N_{B_1,D} = 1,00 \Rightarrow$ НЕ согласие

Шаг 2: Сумма весов согласия: $\sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_T + w_E = 0,25 + 0,20 = 0,45$.

Шаг 3: Индекс согласия: $C(B_2, B_1) = \frac{0,45}{1,00} = 0,45$.

Расчет $D(B_2, B_1)$.

$C: N_{B_1,C} - N_{B_2,C} = 1,00 - 0,00 = 1,00$;

$R: N_{B_1,R} - N_{B_2,R} = 1,00 - 0,00 = 1,00$;

$D: N_{B_1,D} - N_{B_2,D} = 1,00 - 0,00 = 1,00$.

$D(B_2, B_1) = \max\left(\frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}\right) = 1,00$.

Проверка условий превосходства:

Для $B_1 > B_2$:

$C(B_1, B_2) = 0,55 \geq c_0 = 0,60$ – НЕТ!

$D(B_1, B_2) = 1,00 \leq d_0 = 0,40$ – НЕТ!

Для $B_2 > B_1$:

$C(B_2, B_1) = 0,45 \geq c_0 = 0,60$ – НЕТ!

Применение вето. В подзадаче B жестких ограничений нет: $\nu_k = 1,00 \quad \forall k$.

Итоговое решение по подзадаче B :

- $B_1 \not> B_2$ (из-за низкого согласия и высокого несогласия);
- $B_2 \not> B_1$ (из-за низкого согласия).

B_1 и B_2 несравнимы (отношение несравнимости).

Примечание: В классическом *ELECTRE I* в этом случае выбирают альтернативу с лучшей интегральной оценкой:

$G_{B_1} = 0,55, \quad G_{B_2} = 0,45 \Rightarrow B_1$. *ELECTRE I* рекомендует B_1 .

Подзадача В (B_1 или B_2)

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
B_1	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B_2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,10, \quad w_T = 0,05, \quad w_E = 0,15, \quad w_R = 0,45, \quad w_D = 0,25.$$

Расчет $C(B_1, B_2)$:

Шаг 1: По каким критериям B_1 не хуже B_2 :

$$C: N_{B_1,C} = 0,00 < N_{B_2,C} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$T: N_{B_1,T} = 1,00 \geq N_{B_2,T} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

$$E: N_{B_1,E} = 1,00 \geq N_{B_2,E} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

$$R: N_{B_1,R} = 1,00 \geq N_{B_2,R} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

$$D: N_{B_1,D} = 1,00 \geq N_{B_2,D} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

Шаг 2: Сумма весов согласия:

$$\sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_T + w_E + w_R + w_D = 0,05 + 0,15 + 0,45 + 0,25 = 0,90.$$

$$\text{Шаг 3: Индекс согласия: } C(B_1, B_2) = \frac{0,90}{1,00} = 0,90.$$

Расчет $D(B_1, B_2)$:

Шаг 1: Критерии несогласия (B_1 хуже B_2):

$$C: N_{B_2,C} - N_{B_1,C} = 1,00 - 0,00 = 1,00.$$

Шаг 2: Размах: $x_{\max,C} - x_{\min,C} = 1,00 - 0,00 = 1,00.$

$$\text{Шаг 3: Индекс несогласия: } D(B_1, B_2) = \max\left(\frac{1,00}{1,00}\right) = 1,00.$$

Расчет $C(B_2, B_1)$:

Шаг 1: По каким критериям B_2 не хуже B_1 :

$$C: N_{B_2,C} = 1,00 \geq N_{B_1,C} = 0,00 \Rightarrow \text{согласие}$$

$$T: N_{B_2,T} = 0,00 < N_{B_1,T} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$E: N_{B_2,E} = 0,00 < N_{B_1,E} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$R: N_{B_2,R} = 0,00 < N_{B_1,R} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$D: N_{B_2,D} = 0,00 < N_{B_1,D} = 1,00 \Rightarrow \text{НЕ согласие}$$

$$\text{Шаг 2: Сумма весов согласия: } \sum_{k \in \text{согласие}} w_k = w_C = 0,10.$$

Шаг 3: Индекс согласия: $C(B_2, B_1) = \frac{0,10}{1,00} = 0,10$.

Расчет $D(B_2, B_1)$:

$$T: N_{B_1,T} - N_{B_2,T} = 1,00 - 0,00 = 1,00;$$

$$E: N_{B_1,E} - N_{B_2,E} = 1,00 - 0,00 = 1,00;$$

$$R: N_{B_1,R} - N_{B_2,R} = 1,00 - 0,00 = 1,00;$$

$$D: N_{B_1,D} - N_{B_2,D} = 1,00 - 0,00 = 1,00.$$

$$D(B_2, B_1) = \max\left(\frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}; \frac{1,00}{1,00}\right) = 1,00.$$

Проверка условий превосходства:

Для $B_1 > B_2$:

$$C(B_1, B_2) = 0,90 \geq c_0 = 0,60;$$

$$D(B_1, B_2) = 1,00 \leq d_0 = 0,40 \quad - \text{НЕТ!}$$

Условие 2 не выполнено $\rightarrow B_1$ не превосходит B_2 .

Для $B_2 > B_1$:

$$C(B_2, B_1) = 0,10 \geq c_0 = 0,60 \quad - \text{НЕТ!}$$

Применение вето по надежности. Порог вето: $\nu_R = 0,10$.

Проверка для $B_2 > B_1$:

$$\frac{x_{B_1,R} - x_{B_2,R}}{x_{\max,R} - x_{\min,R}} = \frac{1,00 - 0,00}{1,00} = 1,00.$$

$$1,00 > \nu_R = 0,10 \Rightarrow \text{ВЕТО!}$$

Вывод: B_2 не может доминировать над B_1 из-за недопустимого снижения надежности.

Итоговое решение по подзадаче B :

- $B_1 \not> B_2$ (из-за высокого несогласия по стоимости);
- $B_2 \not> B_1$ (из-за вето по надежности).

ELECTRE I рекомендует B_1 .

Сводная результаты метода *ELECTRE I* представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сводная таблица результатов *ELECTRE I*

Подзадача	$C(A_p, A_q)$	Вето	Выбор
A	$C(A_1, A_2) = 0,65 \quad C(A_2, A_1) = 0,35$	$\nu_E = 0,20$	A_1
B	$C(B_1, B_2) = 0,55 \quad C(B_2, B_1) = 0,45$	—	B_1
B	$C(B_1, B_2) = 0,90 \quad C(B_2, B_1) = 0,10$	$\nu_R = 0,10$	B_1

Разработано автором

Оптимальный комплекс по *ELECTRE I*: $A_1 + B_1 + B_1$.

Выбор мероприятий инженерной защиты школы многокритериальным анализом методом *ELECTRE III*

Общая методология метода *ELECTRE III* [19; 20]

Пороги:

- q_k — порог безразличия;
- p_k — порог предпочтения;
- v_k — порог вето.

Степень превосходства по одному критерию:

$$c_k(A_p, A_q) = \begin{cases} 0, & f_k(A_q) - f_k(A_p) \geq p_k \\ \frac{p_k - [f_k(A_q) - f_k(A_p)]}{p_k - q_k}, & q_k < f_k(A_q) - f_k(A_p) < p_k, \\ 1, & f_k(A_q) - f_k(A_p) \leq q_k \end{cases} \quad (8)$$

где:

- f_k — оценка альтернатив по критерию k ;
 q_k — порог безразличия;
 p_k — порог предпочтения.

Нечеткое вето (Fuzzy Veto)

Степень вето:

$$v_k(A_p, A_q) = \begin{cases} 0, & f_k(A_q) - f_k(A_p) \leq p_k \\ \frac{f_k(A_q) - f_k(A_p) - p_k}{v_k - p_k}, & p_k < f_k(A_q) - f_k(A_p) < v_k, \\ 1, & f_k(A_q) - f_k(A_p) \geq v_k \end{cases} \quad (9)$$

Степень превосходства с учетом вето:

$$\sigma(A_p, A_q) = \left[\prod_{k=1}^n \left(\frac{1 - c_k(A_p, A_q)}{1 - v_k(A_p, A_q)} \right)^{w_k} \right] \cdot \left(\sum_{k=1}^n w_k \cdot c_k(A_p, A_q) \right). \quad (10)$$

Упрощенная форма (чаще используется):

$$\sigma(A_p, A_q) = \min_k \max(c_k(A_p, A_q), 1 - v_k(A_p, A_q)). \quad (11)$$

Бинарные отношения в *ELECTRE III*

Отношение слабого превосходства:

$$A_p \succsim A_q; \quad \sigma(A_p, A_q) \geq \lambda, \quad (12)$$

где:

λ — уровень отсечения (обычно 0,75 или 0,80).

Отношение сильного превосходства:

$$A_p \succ A_q; \quad \sigma(A_p, A_q) \geq \lambda \quad \text{и} \quad \sigma(A_q, A_p) < \lambda - \varepsilon. \quad (13)$$

Отношение безразличия:

$$A_p \sim A_q; \quad \sigma(A_p, A_q) \geq \lambda \quad \text{и} \quad \sigma(A_q, A_p) \geq \lambda. \quad (14)$$

Отношение несравнимости:

$$A_p \parallel A_q; \quad \sigma(A_p, A_q) < \lambda \quad \text{и} \quad \sigma(A_q, A_p) < \lambda. \quad (15)$$

Подзадача A (A_1 или A_2) методом ELECTRE III

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
A_1	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00
A_2	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,20, \quad w_T = 0,10, \quad w_E = 0,25, \quad w_R = 0,35, \quad w_D = 0,10.$$

Пороги для подзадачи A:

- $q_k = (0,05; 0,05; 0,05; 0,05; 0,05).$
- $p_k = (0,15; 0,15; 0,15; 0,15; 0,15).$
- $v_k = (0,50; 0,50; 0,20; 1,00; 0,50).$

Расчет $c_k(A_1, A_2)$:

- По стоимости (C): $f_C(A_2) - f_C(A_1) = 0,00 - 1,00 = -1,00.$
 $-1,00 \leq q_C = 0,05 \Rightarrow c_C = 1,00.$
- По трудоемкости (T): $f_T(A_2) - f_T(A_1) = 0,00 - 1,00 = -1,00 \leq q_T \Rightarrow c_T = 1,00.$
- По экологичности (E): $f_E(A_2) - f_E(A_1) = 0,00 - 1,00 = -1,00 \leq q_E \Rightarrow c_E = 1,00.$
- По надежности (R): $f_R(A_2) - f_R(A_1) = 1,00 - 0,00 = 1,00.$
 $1,00 \geq p_R = 0,15 \Rightarrow c_R = 0,00.$
- По долговечности (D): $f_D(A_2) - f_D(A_1) = 0,00 - 1,00 = -1,00 \leq q_D \Rightarrow c_D = 1,00.$

Итоговые $c_k(A_1, A_2)$: $c_k(A_1, A_2) = (1,00; 1,00; 1,00; 0,00; 1,00).$

Расчет $v_k(A_1, A_2)$:

- По всем критериям, где A_1 лучше или равен A_2 : $f_k(A_2) - f_k(A_1) \leq p_k \Rightarrow v_k = 0,00.$
- По надежности (R): $f_R(A_2) - f_R(A_1) = 1,00.$
 $1,00 \geq v_R = 1,00 \Rightarrow v_R = 1,00.$

Итоговые $v_k(A_1, A_2) = (0,00; 0,00; 0,00; 1,00; 0,00)$.

Расчет $\sigma(A_1, A_2) = \min_k \max(c_k; 1 - v_k)$.

- Для C : $\max(1,00; 1 - 0,00) = \max(1,00; 1,00) = 1,00$.
- Для T : $\max(1,00; 1,00) = 1,00$.
- Для E : $\max(1,00; 1,00) = 1,00$.
- Для R : $\max(0,00; 1 - 1,00) = \max(0,00; 0,00) = 0,00$.
- Для D : $\max(1,00; 1,00) = 1,00$.

$\sigma(A_1, A_2) = \min(1,00; 1,00; 1,00; 0,00; 1,00) = 0,00$.

Расчет $c_k(A_2, A_1)$:

- По стоимости (C): $f_C(A_1) - f_C(A_2) = 1,00 - 0,00 = 1,00$.
 $1,00 \geq p_C = 0,15 \Rightarrow c_C = 0,00$.
- По трудоемкости (T): $c_T = 0,00$.
- По экологичности (E): $c_E = 0,00$.
- По надежности (R): $f_R(A_1) - f_R(A_2) = 0,00 - 1,00 = -1,00 \leq q_R \Rightarrow c_R = 1,00$.
- По долговечности (D): $f_D(A_1) - f_D(A_2) = 1,00 - 0,00 = 1,00 \geq p_D \Rightarrow c_D = 0,00$.

Итоговые $c_k(A_2, A_1)$: $c_k(A_2, A_1) = (0,00; 0,00; 0,00; 1,00; 0,00)$.

Расчет $v_k(A_2, A_1)$:

- По экологичности (E) — критическое veto: $f_E(A_1) - f_E(A_2) = 1,00 - 0,00 = 1,00$.
 $1,00 \geq v_E = 0,20 \Rightarrow v_E = 1,00$.
- По стоимости (C): $f_C(A_1) - f_C(A_2) = 1,00$. $1,00 \geq v_C = 0,50 \Rightarrow v_C = 1,00$.
- По трудоемкости (T): $f_T(A_1) - f_T(A_2) = 1,00 \geq v_T = 0,50 \Rightarrow v_T = 1,00$.
- По надежности (R): $v_R = 0,00$.
- По долговечности (D): $f_D(A_1) - f_D(A_2) = 1,00 \geq v_D = 0,50 \Rightarrow v_D = 1,00$.

Итоговые $v_k(A_2, A_1)$: $v_k(A_2, A_1) = (1,00; 1,00; 1,00; 0,00; 1,00)$.

Расчет $\sigma(A_2, A_1)$:

- Для C : $\max(0,00; 1 - 1,00) = \max(0,00; 0,00) = 0,00$.
- Для T : $\max(0,00; 1 - 1,00) = 0,00$.
- Для E : $\max(0,00; 1 - 1,00) = 0,00$.
- Для R : $\max(1,00; 1 - 0,00) = 1,00$.
- Для D : $\max(0,00; 1 - 1,00) = 0,00$.

$\sigma(A_2, A_1) = \min(0,00; 0,00; 0,00; 1,00; 0,00) = 0,00$.

Проверка бинарных отношений ($\lambda = 0,75$):

- $\sigma(A_1, A_2) = 0,00 < 0,75$;

- $\sigma(A_2, A_1) = 0,00 < 0,75$.

$$A_1 \not\sim A_2, \quad A_2 \not\sim A_1.$$

Применение нечеткого вето. Проверка $A_2 \succ A_1$:

$$v_E(A_2, A_1) = 1,00 > 0,50 \Rightarrow \text{вето}.$$

Вывод: A_2 не может доминировать над A_1 из-за недопустимого ухудшения экологии.

Итоговое решение по подзадаче A : *ELECTRE III* рекомендует A_1 .

Подзадача B (B_1 или B_2) методом *ELECTRE III*

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
B_1	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00
B_2	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,30, \quad w_T = 0,25, \quad w_E = 0,20, \quad w_R = 0,15, \quad w_D = 0,10.$$

Пороги для подзадачи B :

- $q_k = (0,05; 0,05; 0,05; 0,05; 0,05)$.

- $p_k = (0,15; 0,15; 0,15; 0,15; 0,15)$.

- $v_k = (0,50; 0,50; 0,50; 0,50; 0,50)$.

$$\text{Итоговые } c_k(B_1, B_2) = (1,00; 0,00; 0,00; 1,00; 1,00).$$

$$\text{Расчет } v_k(B_1, B_2) = (0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00).$$

$$\sigma(B_1, B_2) = \min(1,00; 1,00; 1,00; 1,00; 1,00) = 1,00.$$

$$\text{Итоговые } c_k(B_2, B_1) = (0,00; 1,00; 1,00; 0,00; 0,00).$$

$$\text{Расчет } v_k(B_2, B_1) = (0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00).$$

$$\sigma(B_2, B_1) = \min(1,00; 1,00; 1,00; 1,00; 1,00) = 1,00.$$

Проверка бинарных отношений ($\lambda = 0,75$):

- $\sigma(B_1, B_2) = 1,00 \geq 0,75$;

- $\sigma(B_2, B_1) = 1,00 \geq 0,75$.

$$B_1 \sim B_2 \quad (\text{безразличие}).$$

Итоговое решение по подзадаче B . Обе альтернативы безразличны (одинаково хороши).

Выбор по дополнительным соображениям: B_1 (надежнее, долговечнее, дешевле). *ELECTRE III* рекомендует B_1 .

Подзадача В (B_1 или B_2) методом ELECTRE III

Нормированная матрица:

	C	T	E	R	D
B_1	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
B_2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Веса критериев:

$$w_C = 0,10, \quad w_T = 0,05, \quad w_E = 0,15, \quad w_R = 0,45, \quad w_D = 0,25.$$

Пороги для подзадачи В:

- $q_k = (0,05; 0,05; 0,05; 0,05; 0,05).$
- $p_k = (0,15; 0,15; 0,15; 0,15; 0,15).$
- $v_k = (0,50; 0,50; 0,50; 0,10; 0,30).$

$$\text{Итоговые } c_k(B_1, B_2) = (0,00; 1,00; 1,00; 1,00; 1,00).$$

$$\text{Расчет } v_k(B_1, B_2) = (0,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00).$$

$$\sigma(B_1, B_2) = \min(1,00; 1,00; 1,00; 1,00; 1,00) = 1,00.$$

$$\text{Итоговые } c_k(B_2, B_1): c_k(B_2, B_1) = (1,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00).$$

Итоговые $v_k(B_2, B_1)$:

$$v_k(B_2, B_1) = (0,00; 1,00; 1,00; 1,00; 1,00).$$

$$\sigma(B_2, B_1) = \min(1,00; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00) = 0,00.$$

Проверка бинарных отношений ($\lambda = 0,75$):

- $\sigma(B_1, B_2) = 1,00 \geq 0,75;$
- $\sigma(B_2, B_1) = 0,00 < 0,75.$

$$B_1 \succ B_2 \quad (\text{сильное превосходство}).$$

Итоговое решение по подзадаче В. ELECTRE III рекомендует B_1 .

Сводная результаты метода ELECTRE III представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Сводная таблица результатов ELECTRE III

Подзадача	$\sigma(A_p, A_q)$	$\sigma(A_q, A_p)$	Вето	Отношение
A	$\sigma(A_1, A_2) = 0,00$	$\sigma(A_2, A_1) = 0,00$	$v_E = 0,20$	$A_1 \succ A_2$
B	$\sigma(B_1, B_2) = 1,00$	$\sigma(B_2, B_1) = 1,00$	$v = 0,50$	$B_1 \sim B_2$
B	$\sigma(B_1, B_2) = 1,00$	$\sigma(B_2, B_1) = 0,00$	$v_R = 0,10$	$B_1 \succ B_2$

Разработано автором

Оптимальный комплекс по ELECTRE III: $A_1 + B_1 + B_1$.

Диаграммы чувствительности для всех трех подзадач (А, Б, В)

Для каждой диаграммы изменен вес ключевого критерия от 0 до 1, пересчитывая нормированные веса остальных пропорционально.

Сводный график чувствительности (рис. 3) представляет собой совокупность шести кривых, отображающих изменение интегральных оценок альтернатив в зависимости от ключевых весовых параметров:

По оси абсцисс (X) отложено значение изменяемого весового коэффициента:

- для подзадачи А — w_E (вес экологичности);
- для подзадачи Б — $w_T + w_E$ (суммарный вес трудоемкости и экологичности);
- для подзадачи В — w_R (вес надежности);
- по оси ординат (Y) отложена интегральная оценка G (в долях единицы) для каждой альтернативы.

График позволяет оценить устойчивость принятых решений и определить, при каких изменениях экспертных предпочтений может измениться выбор.

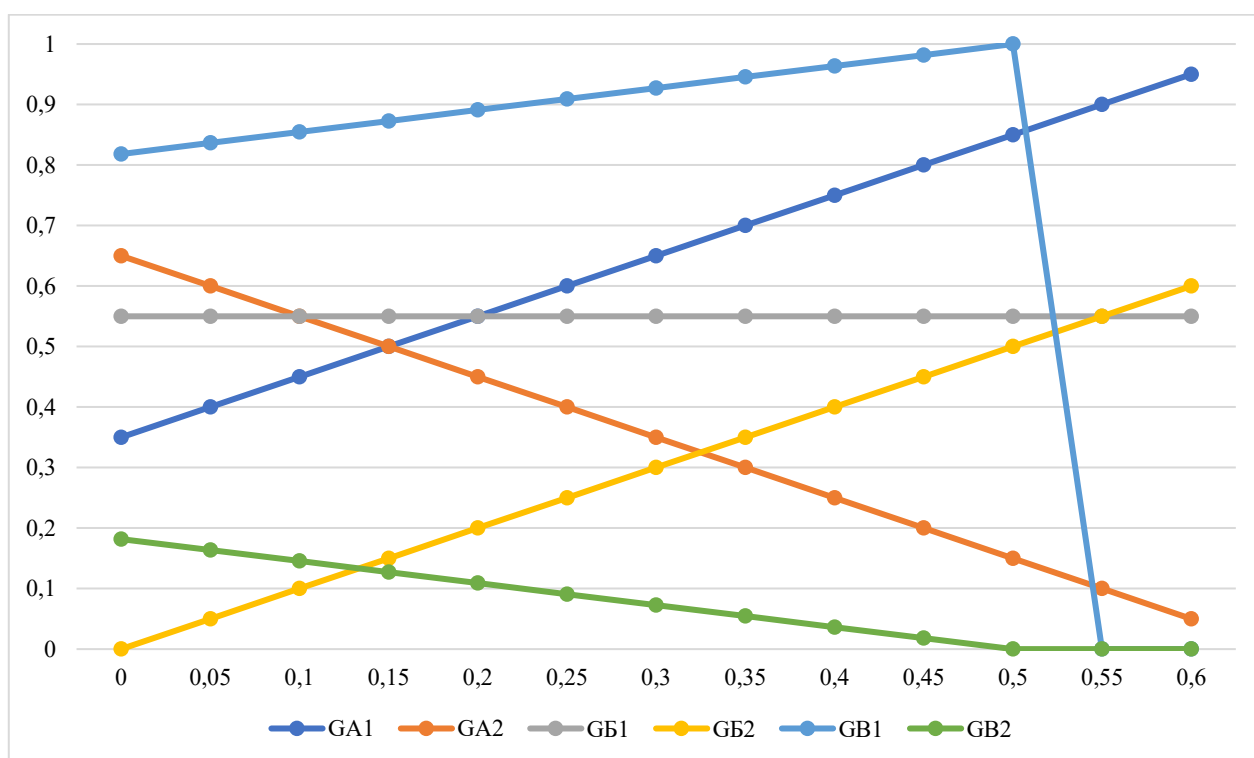


Рисунок 3. График чувствительности (разработано автором)

Анализ подзадачи А (кривые G_{A1} и G_{A2})

Исходное значение: $w_E = 0,25$ (соответствует принятым весам).

Наблюдения:

- Кривая G_{A1} возрастает с ростом w_E : $G_{A1} = 0,35 + w_E$.
- Кривая G_{A2} убывает с ростом w_E : $G_{A2} = 0,65 - w_E$.
- Точка пересечения — при $w_E = 0,15$.

Вывод:

- При $w_E > 0,15$ — A_1 лучше (текущая ситуация).
- При $w_E < 0,15$ — A_2 лучше.
- Запас устойчивости: $\Delta w_E = 0,25 - 0,15 = 0,10$.
- Выбор A_1 устойчив до тех пор, пока вес экологичности не снизится до 0,15.

Анализ подзадачи Б (кривые G_{B1} и G_{B2})

Исходное значение: $w_T + w_E = 0,25 + 0,20 = 0,45$.

Наблюдения:

- Кривая G_{B1} постоянна: $G_{B1} = 0,55$ (не зависит от суммы весов T и E).
- Кривая G_{B2} возрастает линейно: $G_{B2} = w_T + w_E$.
- Точка пересечения — при $w_T + w_E = 0,55$.

Вывод:

- При $w_T + w_E < 0,55$ — B_1 лучше (текущая ситуация).
- При $w_T + w_E > 0,55$ — B_2 лучше.
- Запас устойчивости: $\Delta(w_T + w_E) = 0,55 - 0,45 = 0,10$.
- Выбор B_1 устойчив до тех пор, пока сумма весов трудоемкости и экологичности не превысит 0,55.

Анализ подзадачи В (кривые G_{B1} и G_{B2})

Исходное значение: $w_R = 0,45$.

Наблюдения:

- Кривая G_{B1} слабо возрастает: $G_{B1} = 0,8182 + 0,1818 \cdot w_R$.
- Кривая G_{B2} убывает: $G_{B2} = 0,1818 \cdot (1 - w_R)$.
- Пересечения нет на всем интервале $w_R \in [0; 1]$: $G_{B1} > G_{B2}$ при всех значениях w_R .

Вывод:

- Выбор B_1 абсолютно устойчив и не зависит от веса надежности.
- Даже при $w_R = 0$ (надежность не учитывается) B_1 остается лучше B_2 благодаря преимуществам по долговечности, экологичности и трудоемкости.

Сравнительный анализ устойчивости решений представлен в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ устойчивости решений

Подзадача	Выбор	Критическое значение	Запас устойчивости
A	A_1	$w_E = 0,15$	0,10
B	B_1	$w_T + w_E = 0,55$	0,10
B	B_1	нет	есть

Разработано автором

Интерпретация:

- Наибольшей устойчивостью обладает решение B_1 (не чувствительно к изменению весов).
- Решения A_1 и B_1 имеют одинаковый запас устойчивости (0,10).
- Изменение экспертных оценок более чем на 0,10 может привести к смене выбора в подзадачах A и B .

Рекомендации для принятия решений

Выбор A_1 и B_1 устойчив при разумных изменениях весов.

Для повышения надежности решения рекомендуется:

- провести дополнительный экспертный опрос для уточнения w_E и $w_T + w_E$;
- рассмотреть сценарий $w_E < 0,15$ или $w_T + w_E > 0,55$ как критический.

Выбор B_1 — решение абсолютно устойчиво.

Сводный график чувствительности подтверждает корректность принятых решений: $A_1 + B_1 + B_1$. Наиболее устойчиво решение B_1 ; A_1 и B_1 имеют достаточный запас устойчивости.

Заключение

1. В ходе выполнения работы проведен многокритериальный анализ альтернативных проектных решений по инженерной защите участка строительства школы в г. Сочи. Установлено, что традиционный подход, ориентированный исключительно на минимизацию сметной стоимости, не позволяет в полной мере учесть комплекс факторов, определяющих безопасность, надежность и долговечность объекта. Полученные результаты подтверждают необходимость применения формализованных методов многокритериального анализа при выборе проектных решений в сложных геологических условиях.

2. Сравнительный анализ выполнялся по следующим группам альтернатив:

- для защиты от оползневых процессов — свайные сооружения (классическое решение) и свайно-анкерные системы с использованием анкерных свай;
- для понижения уровня грунтовых вод в период строительства — противифльтрационная завеса из буросекущихся глиноцементобетонных свай диаметром 620 мм и шпунтовое ограждение из свай Ларсен;
- для отвода грунтовых вод в период эксплуатации — пластовый дренаж мощностью 1,0 м с обратным фильтром и система лучевых дрен, объединенных водоприемными колодцами.

3. Для каждой из трех подзадач (выбор типа подпорных сооружений, схемы водопонижения на этапе строительства и на этапе эксплуатации) применены многокритериальные методы превосходства с вето — *ELECTRE I* и *ELECTRE III*. Выбор данных методов обусловлен необходимостью учета жестких ограничений, в том числе экологических (недопустимость вторжения на территорию Национального парка) и геотехнических (обеспечение равномерного распределения порового давления под фундаментами).

4. Оценка альтернатив производилась по пяти критериям: стоимость строительства и эксплуатации, трудоемкость выполнения строительно-монтажных работ, экологическая безопасность, конструктивная надежность, долговечность сооружений. Использование многокритериального подхода позволило выявить альтернативы, обеспечивающие наилучший компромисс между противоречивыми требованиями.

5. Для всех трех подзадач получены согласованные результаты, подтвержденные применением нескольких методов (*ELECTRE I*, *ELECTRE III*, анализ иерархий, серый реляционный анализ), что свидетельствует о робастности принятых решений. В качестве оптимальных рекомендованы: для противооползневой защиты — свайное сооружение (A_1); для водопонижения на строительный период — противифльтрационная завеса из ГЦБ-свай (B_1); для эксплуатационного водопонижения — пластовый дренаж (B_1).

6. Дополнительно на примере оценки коэффициента фильтрации показано, что использование недостоверных исходных данных (в частности, при экономии на инженерно-геологических изысканиях) может привести к ошибочному выбору мероприятий инженерной защиты и, как следствие, к снижению надежности защищаемого объекта. Данный вывод подтверждает необходимость выполнения изысканий в объеме, достаточном для получения достоверных гидрогеологических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferretti V., Montibeller G. Best Practices for Spatial Multicriteria Evaluation: a Critical Review // 22nd International Conference on Multiple Criteria Decision Making. — Malaga, 2013. — P. 131. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/280740457> (дата обращения: 11.08.2026).
2. Маций В. С. Выбор метода укрепления оползнеопасного склона серым реляционным анализом // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13, № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS126.pdf> (дата обращения: 28.04.2025). — DOI: 10.15862/05SATS126.
3. Lu Y., Nie C., Zhou D., Shi L. Research on programmatic multi-attribute decision-making problem: An example of bridge pile foundation project in karst area // PLoS ONE. — 2023. — Vol. 18, No. 12. — P. e0295296. — DOI: 10.1371/journal.pone.0295296.
4. Hu W.-R., Liu H., Zhou X.-T., Wei B., Shang C., Guan P. A New Method for Slope Risk Stability Assessment: Combined Weighting and Improved Cloud Matter-Element Model // Engineering Reports. — 2025. — Vol. 7. — P. e70284. — DOI: 10.1002/eng2.70284.
5. Wu G., Nie X., Zhang X., Yang M., Shi G. Stability Grade Evaluation of Slope with Soft Rock Formation in Open-Pit Mine Based on Modified Cloud Model // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 11. — P. 4706. — DOI: 10.3390/su16114706.
6. Ren C., Song C., Wu L., Fan H., Zhang Q., Li P., Han Z., Yang J. Stability evaluation and reinforcement of ultra-high fill embankment slope of GRS // Frontiers in Earth Science. — 2025. — Vol. 13. — P. 1587121. — DOI: 10.3389/feart.2025.1587121.
7. Tuskan Y., Basari E. Evaluation of Sustainable Slope Stability with Anti-Slide Piles Using an Integrated AHP-VIKOR Methodology // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 15. — P. 12075. — DOI: 10.3390/su151512075.
8. Bai M., Yang L., Liu L., Long W., Xiang Y. Risk assessment of gently inclined mudstone bedding slope incorporating monitoring information // Geomatics, Natural Hazards and Risk. — 2025. — Vol. 16, No. 1. — P. 2452349. — DOI: 10.1080/19475705.2025.2452349.
9. Mumcu Küçüker D. Analyzing Landslide Susceptibility of Forest Roads by Analytical Hierarchy Process (AHP) in Of Forest Planning Unit of Türkiye // Research Square [Preprint]. — 2023. — DOI: 10.21203/rs.3.rs-3490844/v1.

10. El Hamdouni I., Ait Brahim L., El Mahsani A., Abdelouafi A. The Prevention of Landslides Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) in a Geographic Information System (GIS) Environment in the Province of Larache, Morocco // *Geomatics and Environmental Engineering*. — 2022. — Vol. 16, No. 2. — P. 77–92. — DOI: 10.7494/geom.2022.16.2.77.
11. Antonio N.M., Atienza A.S.P., Barnes M.C.M., Bato J.P., Lapid C.J.M., Razon C.G D., Lim C.G., Coronel C.J.A. Landslide Susceptibility Mapping and Slope Stability Analysis: A Basis for the Proposed Community-based Intervention Plan for Geohazard Preparedness in Barangay Nabuclod, Floridablanca, Pampanga // *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. — 2025. — Vol. 8, No. 3. — P. 3045–3063. — URL: <http://www.ijared.com/volume8-issue3.html> (дата обращения: 11.08.2026).
12. Mat Deris A., Solemon B., Taha H., et al. Determination of influencing factors for slope stability using grey relational analysis (GRA) technique // *Systematic Reviews in Pharmacy*. — 2020. — Vol. 11, No. 4. — P. 202–206. — DOI: 10.31838/srp.2020.4.28. — URL: <https://www.sysrevpharm.org/abstract/1109>.
13. Dastpak P., Jamshidi Chenari R., Ghorbani A. A framework to optimize a designed geotechnical system probabilistically using MLP-ANN and ELECTRE decision making — a nailed wall study // *Results in Engineering*. — 2025. — Vol. 2. — P. 100014. — DOI: 10.1016/j.rineng.2025.100014.
14. Entezari M., Davodi A., Gholami M. Evaluation of landslide situation in Kohdasht city using model (ELECTRE-1) // *Geographical Space*. — 2021. — Vol. 21, No. 75. — P. 39–53. — URL: https://geographical-space.ahar.ac.ir/article_160320.html?lang=en (дата обращения: 11.08.2026).
15. Рябухин А. К., Каленик В. В., Шевченко А. Ю. Проблемы строительства полуторарядных свайных противооползневых сооружений // *Современные векторы развития науки: сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год*. — Краснодар, 2024. — С. 130–131. — EDN: IHHQFU.
16. Маций С. И., Рябухин А. К., Безуглова Е. В. Свайно-анкерные противооползневые конструкции. — Краснодар: КубГАУ, 2023. — 211 с. — EDN: RWIYVZ.
17. Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE) // *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*. — 1968. — Vol. 2, No. 8. — P. 57–75. — DOI: 10.1051/ro/196802V100571.
18. Riaz M., Saqlain M., Saeed M. Fermatean fuzzy ELECTRE multi-criteria group decision-making and most suitable biomedical material selection // *Biomedical Signal Processing and Control*. — 2022. — Vol. 73. — P. 103441. — DOI: 10.1016/j.bspc.2022.103441.
19. Roy B. ELECTRE III: un algorithme de classement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples // *Cahiers du Centre d'Études de Recherche Opérationnelle*. — 1978. — Vol. 20, No. 1. — P. 3–24. — Репринт: *European Journal of Operational Research*. — 1990. — Vol. 44, No. 1. — P. 103–113. — DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
20. Gomes M.I., Chibeles-Martins N. The ELECTRE Methods // *Mathematical Models for Decision Making with Multiple Perspectives*. — Boca Raton: CRC Press, 2022. — Ch. 4. — DOI: 10.1201/9781003015154-4.

Matsiy Vladimir Sergeevich

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia

E-mail: matsiy02@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0710-331X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1120320

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57201343171>

Engineering protection of a school building using multi-criteria outranking analysis with veto

Abstract. The paper addresses the pressing problem of selecting optimal engineering protection measures for a school construction site located in the complex geological conditions of Sochi. The site is characterized by steep slopes, active landslide processes, groundwater flooding, and proximity to a specially protected natural area — the National Park. The author substantiates that the traditional approach based solely on cost minimization fails to fully account for the full range of project requirements, including environmental constraints, structural reliability, and durability of the facilities. The following alternative solutions are considered in the paper: for landslide protection of the upper slope — pile structures made of bored piles united by a grillage, and pile-anchor systems with additional anchor elements; for dewatering during the construction period — a cut-off curtain of secant clay-cement-concrete piles and sheet piling made of Larsen L4 steel piles; for dewatering during the operational period — blanket drainage made of inert materials with a filter layer and a system of radial drainage wells connected to collection chambers. A comparative analysis of the alternatives is performed using the multi-criteria outranking methods with veto (ELECTRE I and ELECTRE III), which allow for the incorporation of hard constraints related to environmental and geotechnical factors. The assessment is carried out according to five criteria: construction and operation costs, labor intensity of construction works, environmental impact, structural and operational reliability, and the design service life of the structures. The obtained results demonstrate that the application of multi-criteria analysis enables a well-founded selection of a set of measures ensuring the safety of the facility while meeting environmental requirements and economic feasibility. It is established that all three sub-tasks have consistent solutions, confirmed by several methods.

Keywords: selection of engineering protection measures, multi-criteria outranking methods with veto