

УДК 624.131.6:518.8

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-131-140

ВЫБОР ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ МЕТОДОМ АНАЛИТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В. С. Маций

Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т Трубилина,
г. Краснодар, Россия

Аннотация. Предложено использовать метод аналитических сетей (ANP) для решения геотехнических задач, которые не решаются или решаются со значительными трудностями (выбор противооползневых мероприятий). Показаны преимущества метода ANP перед иерархическими методами, особенно учёт взаимозависимостей между элементами системы (что отражает реальную сложность геотехнических объектов). Решена задача выбора оптимального варианта укрепления глубокой выемки грунта при прокладке автомобильной магистрали «Таврида» с использованием ANP и доказана эффективность комбинированных конструкций (свайно-анкерных и плитно-анкерных).

Ключевые слова: откосы, устойчивость, аналитические сети, выбор мероприятий

SELECTION OF LANDSLIDE MITIGATION MEASURES USING THE ANALYTIC NETWORK PROCESS

V. S. Matsiy

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

Annotation. It is proposed to use the Analytic Network Process (ANP) to solve geotechnical problems that are otherwise unsolvable or present significant difficulties (such as the selection of landslide mitigation measures). The advantages of the ANP method over hierarchical methods are demonstrated, particularly its ability to account for interdependencies between system elements, which reflects the actual complexity of geotechnical objects. The problem of selecting the optimal stabilization method for a deep excavation during the construction of the «Tavrida» highway was solved using ANP, proving the effectiveness of combined structures (pile-anchor and slab-anchor systems).

Keywords: slopes, stability, analytic networks process, selection of countermeasures

Введение

В геотехнике есть очень широкий круг задач, которые не решаются или решаются со значительными трудностями, как например, выбор противооползневых мероприятий. Поэтому необходимо применение многокритериальных методов анализа (МКА), которые способны помочь там, где обычные средства не дают результата. В большом семействе МКА созданный Томасом Саати [1, 2] метод АНП (аналитических иерархий) занимает особое место. И не зря по количеству публикаций, в т. ч. в геотехнике, занимает первое место многие годы [3–6]. Так, в исследовании, проведенном в Бан-

гладеш [7], выполнено сопоставление методов *АНР* и *ANP* для идентификации приоритетных зон оползневой опасности. Это позволило выявить зоны высокого риска, требующие применения мер защиты.

Метод *ANP* (аналитических сетей) — это развитие метода *АНР* для работы со сложными системами, где элементы взаимосвязаны. Основная цель *ANP* — определить глобальные приоритеты альтернатив в условиях взаимосвязанности критериев и альтернатив. Для геотехнических задач инженерной защиты этот метод очень подходит, т. к. геотехническая система — это сеть, где все влияет на все. *ANP* позволяет строить модели со сложными зависимостями и обратными связями.

Для n элементов (критериев или альтернатив) строится квадратная матрица парных сравнений A размера $n \times n$:

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} — оценка превосходства элемента i над элементом j по шкале Саати (табл. 1).

Таблица 1. Шкала Саати

Интенсивность	Определение	Пояснение
1	Равная важность	Оба фактора вносят одинаковый вклад
3	Умеренное превосходство	Опыт и суждения дают легкое предпочтение одному фактору
5	Существенное превосходство	Опыт и суждения дают сильное предпочтение
7	Значительное превосходство	Одному фактору отдается настолько сильное предпочтение, что оно становится практически значимым
9	Абсолютное превосходство	Очевидность превосходства одного фактора над другим подтверждается наиболее сильно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения	Применяются в компромиссных случаях

Для практической геотехники *ANP* — это не замена численному моделированию (*Plaxis*, *GeoStudio*). Это надстройка. *Plaxis* дает нам F_s и картину напряженно-деформированного состояния. *ANP* позволяет взять эти данные, добавить к ним стоимость, логистику, мнения заинтересованных сторон (заказчик, подрядчик) и экологические ограничения, и выдать интегральное, математически обоснованное решение там, где раньше полагались только на интуицию и опыт. Это мощный инструмент для системного

геотехнического анализа, особенно на стадии ТЭО и при выборе стратегии защиты от оползневых процессов. Варианты инженерных решений явно влияют друг на друга через общие ограничения (стоимость, надежность, время), а критерии также взаимосвязаны. Вместо иерархии (как в АНР) строится сеть. Модель состоит из двух основных кластеров: *критерии* (цели) и *альтернативы* (варианты решений).

Сначала выполняются попарные сравнения критериев по отношению к цели. Затем выполняются попарные сравнения для определения влияния между критериями. Здесь мы оцениваем, насколько один критерий влияет на другой. Затем делаются попарные сравнения *альтернатив* по отношению к каждому *критерию*.

Завершается расчет построением суперматрицы: нормализованные матрицы суждений объединяются в одну большую матрицу — невзвешенную суперматрицу; затем она преобразуется во взвешенную суперматрицу, где сумма элементов в каждом столбце равна 1; взвешенная суперматрица возводится в степень до тех пор, пока ее значения не стабилизируются. Получается предельная суперматрица. Столбцы в этой предельной матрице идентичны. Веса из строки, соответствующей кластеру *Альтернативы*, и будут итоговыми приоритетами вариантов.

Построение суперматрицы — это главное в концепции АНР:

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где W_{ij} — матрица, показывающая влияние кластера j на кластер i .

Для учета важности кластеров строится взвешенная суперматрица:

$$\hat{W} = [w_{ij} \cdot W_{ij}], \quad (3)$$

где w_{ij} — вес влияния кластера j на кластер i .

Для нахождения глобальных приоритетов взвешенная суперматрица возводится в степень до сходимости для получения предельной суперматрицы:

$$W_{limit} = \lim_{k \rightarrow \infty} \hat{W}^k. \quad (4)$$

Преимущества метода АНР для геотехнических задач по сравнению с GRA (серый реляционный анализ) [8]: учет нелинейных связей (метод АНР явно моделирует, как, например, рост требований к надежности влияет на стоимость и сроки, и как это, в свою очередь, меняет предпочтения между *альтернативами*); структурированный подход к экспертным оценкам приводит к тому, что процесс попарных сравнений естественнее и точнее для

человека, чем прямое назначение весов; проверка согласованности в *ANP* позволяет рассчитать индекс согласованности, который показывает, насколько непротиворечивы были суждения эксперта. В *GRA* такой проверки нет; сетевая модель очень наглядно представляет сложность задачи.

Хотя метод *ANP* требует больше вычислительных усилий и времени на сбор экспертных оценок, он дает гораздо более обоснованный и надежный результат, так как отражает реальную сложность и взаимосвязь факторов в проектировании ответственных сооружений.

Выбор варианта укрепления склона методом аналитических сетей (*ANP*)

Метод *ANP* особенно эффективен для сложных инженерных проблем с множеством взаимосвязанных критериев и альтернатив. Многие геотехнические задачи именно такие. Рассмотрим решение конкретной задачи поиска оптимального варианта укрепления глубокой выемки грунта при прокладке автомобильной магистрали «Таврида». Задача уже решалась нами серым реляционным анализом (*GRA*) [8].

Основными критериями оценки являются: *ЭЭ, НС, Д, ТС, ЭК, Сейсм.*
Кластер «Альтернативы»: *УО, МБС, ГАБ, СПС, САС, ПАК, КК.*

Далее определяем связи в сети, задавая ключевой вопрос *ANP*: «Какие критерии влияют друг на друга?» В *ANP* мы не строим простую иерархию. Мы строим сеть с зависимостями. Устанавливаем степень влияния внутри кластера *Критерии* (внутренняя зависимость):

– *Стоимость ЭЭ* зависит от: *НС* (чем выше требуемая несущая способность, тем дороже решение); *Д* (как правило, более долговечные конструкции требуют больших первоначальных вложений); *ТС* (высокая технологическая сложность обычно увеличивает стоимость); *Сейсм* (обеспечение стойкости к динамическим нагрузкам существенно повышает стоимость).

– *Несущая способность НС* зависит от: *ЭЭ* (бюджетные ограничения напрямую влияют на предельную несущую способность); *ТС* (сложные технологии позволяют достичь более высокой несущей способности).

– *Долговечность Д* зависит от: *ЭЭ*. (долговечные материалы и конструкции дороже; *НС* (конструкция, рассчитанная на высокие нагрузки, часто имеет и большой запас долговечности).

– *Технологическая сложность ТС* зависит от: *НС* (сложные задачи по обеспечению несущей способности требуют сложных технологий); *Сейсм* (противосейсмические мероприятия значительно усложняют конструкцию и монтаж).

– *Экологичность ЭК* зависит от: *ТС* (зеленые технологии могут быть более сложными в реализации); *ЭЭ* (экологичные решения (например, биологическая устойчивость габионов) могут иметь разную стоимость).

– *Стойкость к динамическим нагрузкам Сейсм* зависит от: *ЭЭ* (сейсмостойкость — дорогое дополнение); *НС* (является основой для сейсмостойкости); *ТС* (сильно зависит от сложности инженерных решений (демпферы, анкеровка и т. д.)).

Визуально сеть выглядит как два кластера с множеством двунаправленных стрелок внутри кластера *Критерии*. Также есть стрелки от кластера *Критерии* к кластеру *Альтернативы* (оценка альтернатив по критериям).

Далее определяется влияние альтернатив на критерии (обратная связь). Это является ключевым отличием метода *ANP* от *АНР*. Выбор альтернативы меняет значимость критериев. Если мы рассматриваем *Уположение*, критерий *ЭК* становится очень важным (минимальное вмешательство), а *ТС* — низким (простота). Если мы рассматриваем *САС* или *ПАК*, резко возрастает значимость критерия *Сейсм* (анкера чувствительны к динамике) и *Д* (коррозия анкеров).

На следующем этапе выполняются попарные сравнения и построение суперматрицы. Для краткости дадим итоговые обобщенные векторы приоритетов, основанные на экспертной оценке (логике инженера-геотехника) для заданных условий. Мы не можем сразу определить, что важнее. Поэтому должны учесть влияние, которое критерии оказывают друг на друга (табл. 2).

Таблица 2 – Результат синтеза (веса критериев)

Критерий	Вес (приоритет)	Обоснование для выемки грунта глубиной 37 м
<i>НС</i> (Несущая способность)	0,31	Безопасность превыше всего. При такой глубине нагрузка на конструкцию колоссальна. Это доминирующий фактор
<i>Сейсм</i> (Сейсмостойкость)	0,22	Если район сейсмичный, для высоких жестких стен это критично. Ставим вторым по важности
<i>Д</i> (Долговечность)	0,18	Дорога строится на десятилетия. Требуется высокой надежности на весь срок службы
<i>ЭЭ</i> (Экономика)	0,15	Важно, но не ценой безопасности. Удешевление на 10 % не оправдывает риск обрушения
<i>ТС</i> (Тех. сложность)	0,08	При глубине 37 м любые технологии сложны. Фактор становится вторичным, если подрядчик компетентен
<i>ЭК</i> (Экология)	0,06	В выемке, вдали от жилья, экология минимальна (шумы, пыль). Незначимый фактор

Далее оцениваем, насколько каждая альтернатива хороша с точки зрения отдельного критерия:

– *НС: МБС* (гравитационная стена) абсолютно надежна, но требует прочного основания. Свайные и свайно-анкерные системы также высоконадежны. *УО* (если позволяет место) снижает нагрузку до нуля — безопасно, но по критерию несущая способность стены, она пассивна.

– *Сейсм*: Свайно-анкерные и комбинированные системы (анкера могут быть демпферами) часто предпочтительнее жесткой массивной стены, которая может опрокинуться или треснуть.

– *ЭЭ и ТС*: Уположение — это выбор бедняка, если есть земля под отвод. Габионы просты, но для $H=37$ м потребуют огромной массы и ширины. *МБС* — очень дорого и сложно в бетонировании.

– *ЭК*: Габионы и уположение эстетичны и экологичны, бетон — нет.

Далее определяем влияние альтернатив на критерии (сеть). Мы должны ответить на вопрос: «Если мы выберем альтернативу X , как это изменит важность критериев?» Для альтернативы *Свайно-анкерные сооружения (САС)*, коррозионная стойкость (*Д*) и качество натяжения (*ТС*) становятся важнее, чем для массивной стены. Для *Уположения откосов (УО)*, фактор *Экологии (ЭК)* становится самым важным, а *Технологическая сложность (ТС)* — не важна вообще. Строим матрицы вида «Сравнение критериев относительно Альтернативы».

Для высоты 10–15 м свайно-анкерная стена (*САС*) — это просто ряд свай с анкерами. Для высоты 37 м *САС* — это уже высотное сооружение. Арматурный каркас 40-метровой сваи (весом несколько тонн) нужно собрать и опустить в скважину. Момент на забое сваи колоссальный. Анкера становятся длиннее 40 м, с двумя-тремя ярусами. В таких условиях *САС* сталкивается с проблемами технологического предела и деформативности.

В *АНР* важно учитывать контекст кластера «*Системные эффекты высоты 37 м*», как влияющий на связи между критериями и альтернативами.

– Альтернатива *Свайно-анкерные сооружения (САС)* имеет сильную обратную связь с критерием *Технологическая сложность (ТС)*. Для $H = 37$ м эта сложность становится не 0,09, а значительно выше.

– Альтернатива *Плитно-анкерные конструкции (ПАК)* при высоте 37 м — это уже не просто плита, а, по сути, тонкая анкеруемая стена. Это снижает ее технологическую сложность по сравнению со свайным полем огромного диаметра.

– Вводим супер-альтернативу: *Комбинированные конструкции (КК)*. Для высоты 37 м это должно быть: нижний ярус (0–20 м) — свайно-анкерная конструкция; верхний ярус (20–37 м) — плитно-анкерная.

В результате мы получаем веса критериев альтернатив (табл. 3).

Таблица 3. Матрица приоритетов альтернатив

Альтернатива	<i>НС</i> (0,31)	<i>Сейсм</i> (0,22)	<i>Д</i> (0,18)	<i>ЭЭ</i> (0,15)	<i>ТС</i> (0,08)	<i>ЭК</i> (0,06)
<i>УО</i> (Уположение)	0,02	0,05	0,03	0,25	0,35	0,40
<i>МБС</i> (Массивный бетон)	0,30	0,10	0,35	0,05	0,06	0,08
<i>ГАБ</i> (Габионы)	0,05	0,08	0,04	0,15	0,20	0,25
<i>СПС</i> (Свайные)	0,18	0,15	0,18	0,12	0,10	0,07
<i>САС</i> (Свайно-анкерные)	0,22	0,24	0,18	0,14	0,10	0,06
<i>ПАК</i> (Плитно-анкерные)	0,15	0,20	0,14	0,17	0,14	0,08
<i>КК</i> (Комбинированные)	0,25	0,24	0,22	0,18	0,15	0,10

Для наполнения модели экспертными оценками необходимы мнения экспертов-геотехников и проектировщиков. Сначала сравним важность критериев по отношению к главной цели (*Выбор оптимального метода защиты*). Вопрос: «Насколько критерий *Несущая способность (НС)* важнее критерия *Экономическая эффективность (ЭЭ)* для обеспечения безопасности выемки глубиной до 37 метров?». Вариант ответа гипотетического эксперта: «Для такой глубокой выемки безопасность критична, поэтому *НС* существенно важнее *ЭЭ*». Оценка 6.

Проведем попарные сравнения для определения взаимовлияния критериев. Оценим, насколько один критерий влияет на другой. Сравнения *Альтернатив* по отношению к каждому *Критерию* – это объективная часть, где можно опираться на расчетные и статистические данные. После построения взвешенной суперматрицы по (3), возведения ее в степень до сходимости (4), получаем предельные приоритеты (табл. 4).

Таблица 4 – Итоговый рейтинг альтернатив

Ранг	Альтернатива	Вес	Интерпретация
1	Комбинированные конструкции (<i>КК</i>)	0,284	Абсолютный лидер. Сочетает достоинства: свайно-анкерной (обеспечивает <i>НС</i> и <i>Д</i>), и плитно-анкерной (снижает нагрузку, стоимость и повышает экологичность верха откоса. Лучший ответ на вызовы большой высоты
2	Свайно-анкерные сооружения (<i>САС</i>)	0,211	Мощное решение, но требует высочайшего качества исполнения анкеров и многоярусной системы, что делает его чуть менее технологичным и более чувствительным к качеству работ, чем <i>КК</i>
3	Плитно-анкерные конструкции (<i>ПАК</i>)	0,193	Очень сильный конкурент. «Стена в грунте» с анкерами – это разновидность <i>КК</i>
4	Свайные противоползневые сооружения (<i>СПС</i>)	0,148	Чисто консольная схема для 37 м потребует свай такого диаметра и армирования, что это становится техническим гигантизмом. Экономически нецелесообразно

Ранг	Альтернатива	Вес	Интерпретация
5	Массивная бетонная стена (МБС)	0,141	Классика. Требует идеального основания и создания дренажа. При глубокой выемке объем бетона колосса-лен, плюс высокая сейсмоопасность жесткой си-стемы. Оправдана только при особых архитектурных требованиях
6	Уположение откосов (УО)	0,081	Идеально инженерно, но ужасно с экономически (изъ-ятие огромных территорий, объемы выемки растут в разы). В стесненных условиях – нереализуемо
7	Габионные конструкции (ГАБ)	0,056	Категорически не применимы для высоты 37 м. Применимы для локального укрепления или в комби-нации

Таким образом интуиция блестяще подтверждена математикой *ANP* при корректной настройке модели. Комбинированные конструкции (*КК*) побеждают в расчете, потому что при глубине 37 м мы имеем дело с двумя разными зонами напряженно-деформированного состояния. В нижней зоне (максимальных нагрузок) нужно мощное, жесткое, заложение (сваи с анкерами). В верхней зона давление грунта за конструкцией уже частично передано вниз, поэтому конструкцию можно облегчать. Это решение: надежно (сваи держат низ); экономично (мы не бетонируем 37-метровую стену от поверхности); технологично (работает поэтапно); долговечно (нижняя часть защищена от промерзания/выветривания).

ANP позволяет не просто выбрать «самый прочный» или «самый дешевый» вариант, а найти решение, которое является наиболее сбалансированным с учетом всех сложных взаимосвязей между критериями. Для такой ответственной задачи, как укрепление выемки глубиной 37 метров, этот метод предоставляет строгое математическое обоснование для принятия итогового проектного решения. Комбинированные конструкции являются лучшим вариантом, что идеально иллюстрирует силу метода *ANP*, т. к. не просто складываются баллы, а учитывается синергия и компенсаторные эффекты. Комбинированные конструкции (например, сваи + анкеры + плиты) демонстрируют свои ключевые преимущества именно там, где есть сильные взаимовлияния критериев.

В результате детального проектирования предусмотрены следующие мероприятия инженерной защиты (рис. 1):

– Возведение двухрядного свайного сооружения протяженностью 175 м из буронабивных свай, объединенных железобетонным ростверком; три яруса анкеров типа *Titan 73/53* с монолитными плитами.

– Плитно-анкерное укрепление откоса – из монолитных железобетонных плит в семь ярусов. Крепление к откосу анкерными сваями типа *Titan 73/53*. Ширина берм – 6,0 м.

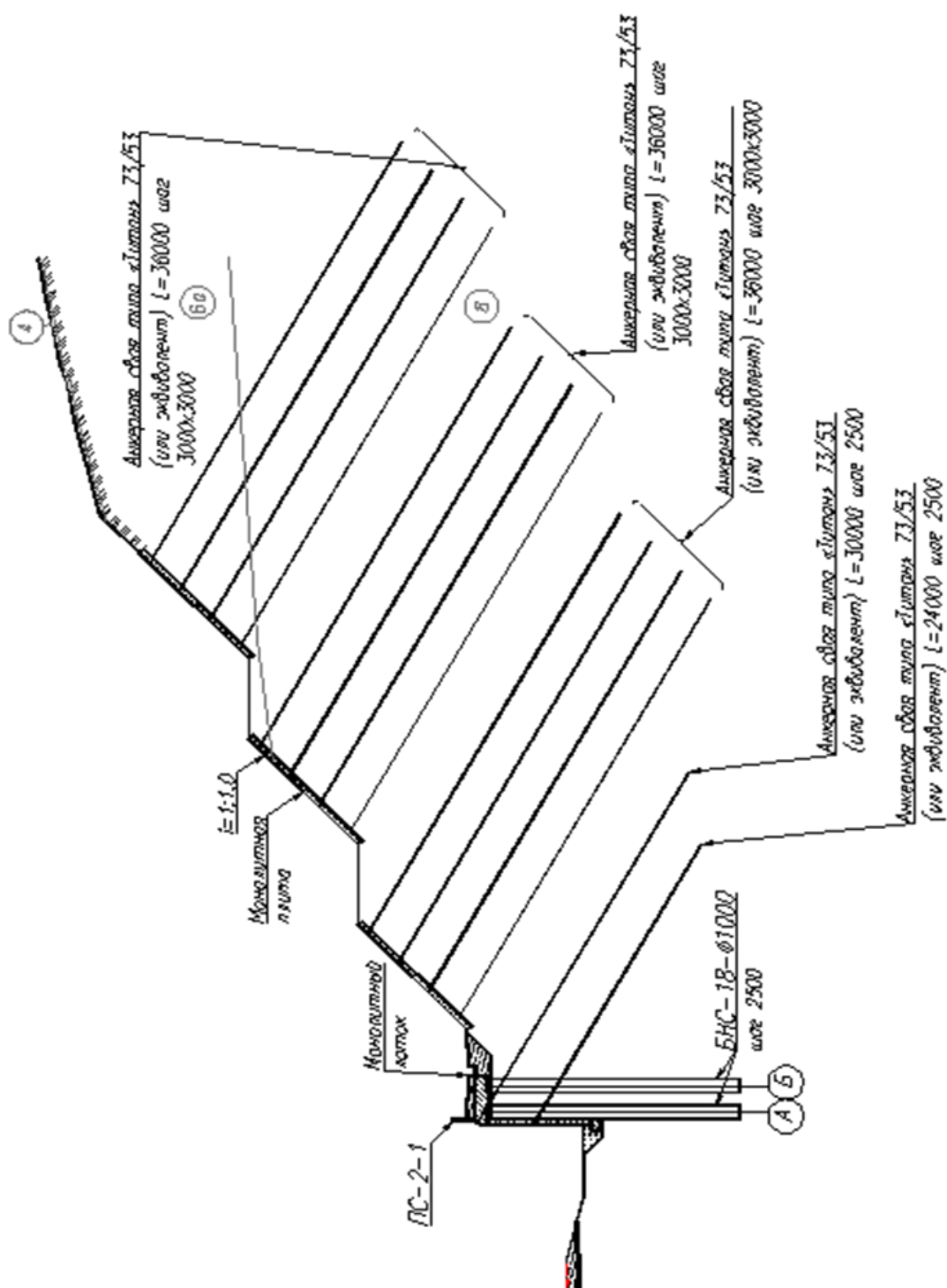


Рис. 1. Защита откосов на участке ПК52+22,01 – ПК53+95,32 трассы «Таврида»

Заключение

Показано, что метод *ANP* имеет принципиальные преимущества перед иерархическими методами: учёт взаимозависимостей между элементами системы (что отражает реальную сложность геотехнических объектов); гибкость моделирования произвольных сетевых структур; математическую проверку согласованности экспертных суждений; возможность визуализации сложных взаимосвязей. Доказано, что *ANP* наиболее эффективен для задач с множеством взаимосвязанных критериев и альтернатив. Метод *ANP* рекомендован к применению в геотехнике для выбора типа защитных сооружений с возможностью математически строгого сравнения альтернатив по единому набору критериев (эффективность, долговечность, стоимость, экология), что исключает субъективизм при обосновании решений перед заказчиком. На примере задачи выбора оптимального варианта укрепления глубокой выемки грунта при прокладке автомобильной магистрали «Таврида» с использованием *ANP* доказана эффективность комбинированных конструкций (свайно-анкерных и плитно-анкерных). Результаты верифицированы альтернативным методом серого реляционного анализа (*GRA*), что подтверждает робастность полученного решения.

Список источников

1. Saaty, T. L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process [Text] / T. L. Saaty. – Pittsburgh: RWS Publications, 1996. – 370 p.
2. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation [Text] / T. L. Saaty. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 p.
3. Bai, M. Risk assessment of gently inclined mudstone bedding slope incorporating monitoring information [Text] / M. Bai, L. Yang, L. Liu, W. Long, Y. Xiang // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2025. – Vol. 16, № 1. – P. 2452349. – DOI: 10.1080/19475705.2025.2452349.
4. Ren, C. Stability evaluation and reinforcement of ultra-high fill embankment slope of GRS [Text] / C. Ren, C. Song, L. Wu, H. Fan, Q. Zhang, P. Li, Z. Han, J. Yang // Frontiers in Earth Science. – 2025. – Vol. 13. – P. 1587121. – DOI: 10.3389/feart.2025.1587121.
5. Tuskan, Y. Evaluation of Sustainable Slope Stability with Anti-Slide Piles Using an Integrated AHP-VIKOR Methodology [Text] / Y. Tuskan, E. Basari // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 15. – P. 12075. – DOI: 10.3390/su151512075.
6. Wu, G. Stability Grade Evaluation of Slope with Soft Rock Formation in Open-Pit Mine Based on Modified Cloud Model [Text] / G. Wu, X. Nie, X. Zhang, M. Yang, G. Shi // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, № 11. – P. 4706. – DOI: 10.3390/su16114706.
7. Rahman, Md. M. Comparative multi-criteria decision-making approaches for landslide susceptibility mapping in Khagrachhari district of southeastern Bangladesh [Text] / Md. M. Rahman, Md. F. R. Joy, A. Ahmed, A. Tabassum, Md. S. Sarker, T. K. Barman // Research Square. – 2025. – Preprint. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-7362869/v1.
8. Deng, J. L. Control problems of grey systems [Text] / J. L. Deng // Systems & Control Letters. – 1982. – Vol. 1, № 5. – P. 288–294. – DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
9. Маций, В. С. Выбор метода укрепления оползнеопасного склона серым реляционным анализом / В. С. Маций // Транспортные сооружения. – 2026. – Т 13. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS126.pdf>. – DOI: 10.15862/05SATS126. (дата обращения: 28.04.2026).

© Маций В. С., 2026