

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/05SATS126.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS126 (<https://doi.org/10.15862/05SATS126>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

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.

**For citation:**

Matsiy V.S. Selecting a method for strengthening a landslide-prone slope using gray relational analysis. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(1): 05SATS126. Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS126. (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](mailto:matsiy02@gmail.com)

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

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1120320](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1120320)

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

## Выбор метода укрепления оползнеопасного склона серым реляционным анализом

**Аннотация.** В статье рассмотрено применение серого реляционного анализа для выбора метода укрепления глубоких (до 37 метров) выемок грунта при строительстве автомобильной дороги «Керчь — Феодосия — Белогорск — Симферополь — Бахчисарай — Севастополь («Таврида») в условиях сложного рельефа местности. Автором изучены грунтовые условия и распространение водоносных горизонтов на наиболее сложных участках трассы. На исследуемой территории выявлена потенциальная опасность развития неблагоприятных экзогенных процессов: развитие оползневых очагов при подрезке склонов; развитие крипа; эрозия; заболачивание и выветривание грунтов. Это потребовало детального вариантного проектирования противооползневых мероприятий. Автором рассмотрены различные варианты инженерной защиты автомобильной дороги: уположение откосов до необходимых уклонов; устройство массивных бетонных подпорных стен; устройство габионных конструкций; укрепление свайными противооползневыми сооружениями; укрепление свайно-анкерными конструкциями; укрепление плитно-анкерными конструкциями; применение комбинированных (свайно-анкерных и плитно-анкерных) конструкций. Основными критериями в оценке серым реляционным анализом являлись: экономическая эффективность; несущая способность; долговечность; технологическая сложность; стойкость к сейсмическим нагрузкам. Для всех мероприятий рассчитаны коэффициенты реляционной связи и определены интегральные показатели. На основании итогового ранжирования вариантов укрепления склона определена рациональность применения комбинированных (свайно-анкерных и плитно-анкерных) конструкций. Технико-экономическое сравнение рассмотренных вариантов на основе серого реляционного анализа позволило запроектировать наиболее надежные сооружения, которые построены и в настоящее время успешно эксплуатируются.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; откосы; оползень; уположение; серый реляционный анализ; комбинированные конструкции; сейсмичность

## Введение

На ряде участков строительства автомобильной дороги «Таврида» сложный рельеф местности потребовал устройства глубоких выемок. При этом формируются высокие (свыше 15 метров) откосы. Традиционное решение путём их уположения оказалось неприемлемым, так как вело к критическому расширению полосы отвода и изъятию обширных земель. В связи с этим возникла необходимость в проектировании компактных и эффективных конструкций инженерной защиты. Ключевым аспектом для таких сооружений является оценка их долговременной эксплуатационной надёжности, осуществляемая в рамках диагностики технического состояния [1; 2].

## Инженерно-геологические условия строительства автомобильной дороги при устройстве глубоких выемок

В геолого-литологическом строении изучаемой территории принимают участие отложения верхнеальбского-нижнемиоценового возраста. Породы представлены терригенно-карбонатной формацией (глинисто-известковой) резко меняясь по мощности и составу. В геологическом строении участка принимают участие элювиальные отложения миоцена сарматского яруса, эоцена бодракского и альминского ярусов, аллювиальные четвертичные отложения, перекрытые с поверхности современными образованиями. В результате анализа пространственной изменчивости частных показателей свойств грунтов, определенных лабораторными испытаниями, с учетом данных о геологическом строении и литологических особенностях грунтов, выделено тринадцать инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Из них на исследуемых участках присутствуют ИГЭ-6, ИГЭ-6а, ИГЭ-7 и ИГЭ-8.

Делювиальные отложения (*d IV*). ИГЭ-6 — суглинок тяжелый твердый незасоленный среднепросадочный с включениями щебня известняка 5–15 % и прослоями известковой муки, светло-серого цвета. Грунт относится к сильно-пучинистому. Расчетные характеристики: удельный вес  $\gamma = 15,4 \text{ кН/м}^3$ ; сцепление  $c = 14 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 14^\circ$  (по подготовленной поверхности); сцепление  $c = 31 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 17^\circ$  (неконсолидированным сдвигом).

Неогеновая система (*N*). Отложения среднего миоцена нижнесарматского подъяруса (*N<sub>1</sub>S<sub>1</sub>*). ИГЭ-6а — кора выветривания (суглинок тяжелый твердый, с прослоями мергеля, известняка средней плотности и известковой муки мощностью от 5 см до 30 см), светло-серого, коричневого цветов. Грунт относится к сильнопучинистому. Расчетные характеристики: удельный вес  $\gamma = 18,9 \text{ кН/м}^3$ ; сцепление  $c = 11 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 14^\circ$ , (по подготовленной поверхности); сцепление  $c = 25 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 21^\circ$  (неконсолидированным сдвигом).

ИГЭ-8 — глина легкая твердая, незасоленная, с прослоями известняка средней прочности от 5 см до 30 см и с включениями щебня известняка до 15 %, по степени размокаемости от очень быстрой до очень медленной, коричневого цвета. Грунт относится к пучинистому. Расчетные характеристики: удельный вес  $\gamma = 19,7 \text{ кН/м}^3$ ; сцепление  $c = 15 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 12^\circ$ , (по подготовленной поверхности); сцепление  $c = 64 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 17^\circ$  (неконсолидированным сдвигом).

Палеогеновая система (*P*). Нерасчлененные отложения эоцена бодракского и альминского ярусов (*P<sub>2</sub>bd + a*). ИГЭ-7 — глина легкая твердая, незасоленная, с прослоями

мергеля, по степени размокаемости от медленной до неразмокающего, светло-коричневого цвета. Грунт относится к пучинистому.

Расчетные характеристики: удельный вес  $\gamma = 17,6 \text{ кН/м}^3$ ; сцепление  $c = 17 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 13^\circ$ , (по подготовленной поверхности); сцепление  $c = 38 \text{ кПа}$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 16^\circ$  (неконсолидированным сдвигом).

Питание водоносных горизонтов происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и снеготаяния. Глубина установления равна от 4,2 до 7,3 м. Во время паводка уровень грунтовых вод будет стремиться подняться до дневной поверхности.

Сейсмическая интенсивность района проектирования на территории г. Севастополь принята в соответствии с Изменением № 1 СП 14.13330.2014, утвержденным и введенным в действие приказом Минстроя России от 23.11.15 г. № 844/пр.

Расчетная сейсмическая интенсивность района в баллах шкалы *MSK 64* для средних грунтовых условий и трех уровней сейсмической опасности (*A, B, C*) по карте *ОСР-2015* принимаем для г. Инкерман, соответственно, 8, 9 и 9 баллов. Категория опасности процессов — весьма опасные.

На исследуемой территории существует потенциальная опасность развития неблагоприятных экзогенных процессов:

1. Развитие оползневых очагов при подрезке склонов. Склоны оврагов и балок местами довольно крутые. Для местности в районе Мекензиевых гор и непосредственно территории г. Севастополя характерно развитие оползневых процессов, возникновение которых в большинстве случаев связано с результатами инженерно-хозяйственной деятельности человека, выражающейся в проведение земляных работ на склонах и возвышенностях.

2. Развитие крипа, процесса медленного течения, связанного со специфическими свойствами грунтов, и усадкой при высыхании. В естественном состоянии участки сильно задернованы, что частично защищает от переувлажнения в период обильных осадков залегающие ниже грунты. При нарушении дернового слоя крип может получить широкое распространение даже на пологих склонах.

3. Боковая и донная эрозия, связанная с нарушением дернового покрова.

4. Заболачивание. Грунты, слагающие участок изысканий, представлены глинами с низким коэффициентом фильтрации, которые являются хорошим водоупором. При неправильной вертикальной планировке территории во время строительства, в период выпадения обильных осадков, существует опасность заболачивания сопредельных территорий и даже их подтопление.

5. Физическое выветривание делювиальных и элювиальных глин, слагающих территории в откосах искусственных выемок, которые вырабатываются под строительство трассы «Таврида».

### Вариантное проектирование противооползневых мероприятий серым реляционным анализом

Наиболее сложными для инженерной защита на трассе «Таврида» оказался участок на ПК29 — ПК78 в районе г. Севастополя.

Здесь выделено 5 оползнеопасных объектов со значительными объемами выемки грунта. Параметры приведены в таблице 1.

Наиболее значительные выемки грунта предполагались на втором участке (до 37 метров). Для него были рассмотрены различные варианты инженерной защиты автомобильной дороги:

- уположение откосов до необходимых уклонов;
- устройство массивных бетонных подпорных стен;
- устройство габионных конструкций [3];
- укрепление свайными противооползневыми сооружениями;
- укрепление свайно-анкерными сооружениями [4; 5];
- укрепление плитно-анкерными конструкциями;
- применение комбинированных (свайно-анкерных и плитно-анкерных) конструкций.

Таблица 1

Параметры участков глубоких выемок на трассе «Таврида»

Номер участка	Пикетаж участка	Длина участка, м	Величина срезки, м
1	ПК29 + 46,82 — ПК31 + 78,88	232	23,5
2	ПК51 + 88,65 — ПК53 + 95,32	207	37
3	ПК61 + 21,90 — ПК62 + 13,23	91	24
4	ПК76 + 50,00 — ПК77 + 71,08	121	25,5
5	ПК80 + 38,94 — ПК82 + 95,87	257	35,5

Составлено автором

Другие возможные варианты были отклонены из-за очень большой высоты выемки. Так, нагелирование не решает вопроса обеспечения устойчивости в слабых грунтах. Дренажные мероприятия нерациональны по причине струйного течения вод в массиве грунта.

Основными критериями оценки серым реляционным анализом [6–15] являются:

1. Экономическая эффективность  $ЭЭ$  (стоимость укрепления на 1 м<sup>2</sup>).
2. Несущая способность  $НС$  (предельная нагрузка в кПа).
3. Долговечность  $Д$  (срок службы в годах).
4. Технологическая сложность  $ТС$  (трудоемкость реализации).
5. Экологичность  $ЭК$  (влияние на окружающую среду).
6. Стойкость к динамическим нагрузкам  $Сейсм$  (работа сооружения в условиях сеймики) [16].

Составляем матрицу принятия решений. Нормализованные исходные данные задачи (0–1) представлены в таблице 2, а разность показателей в таблице 3.

Таблица 2

Нормализованные исходные данные вариантов укрепления склона

Вариант укрепления	$ЭЭ$ $X_1$	$НС$ $X_2$	$Д$ $X_3$	$ТС$ $X_4$	$ЭК$ $X_5$	$Сейсм.$ $X_6$
Эталон $X_0$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Уположение откосов	0,95	0,30	0,35	0,90	0,85	0,25
Бетонные стены	0,60	0,70	0,92	0,55	0,35	0,90
Габионные стены	0,75	0,65	0,55	0,70	0,85	0,60
Свайные сооружения	0,45	0,85	0,80	0,35	0,55	0,85
Свайно-анкерные сооружения	0,35	0,96	0,90	0,30	0,45	0,92
Плитно-анкерные сооружения	0,40	0,94	0,92	0,40	0,50	0,94
Комбинированные	0,30	0,99	0,95	0,25	0,40	0,97

Составлено автором

Таблица 3

Расчет разностей  $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$

Вариант укрепления	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$	$\Delta_6$
Уположение откосов	0,05	0,70	0,65	0,10	0,15	0,75
Бетонные стены	0,40	0,30	0,08	0,45	0,65	0,10
Габионные стены	0,25	0,35	0,45	0,30	0,15	0,40
Свайные сооружения	0,55	0,15	0,20	0,65	0,45	0,15
Свайно-анкерные сооружения	0,65	0,04	0,10	0,70	0,55	0,08
Плитно-анкерные сооружения	0,60	0,06	0,08	0,60	0,50	0,06
Комбинированные	0,70	0,01	0,05	0,75	0,60	0,03

Составлено автором

Глобальные экстремумы  $\Delta_{\min} = \min(\Delta_{0i}(k)) = 0,01$  и  $\Delta_{\max} = \max(\Delta_{0i}(k)) = 0,75$ .

Далее проведем расчет весов критериев методом энтропии. Нормирование исходной матрицы (расчет вероятностей  $p_{ij}$ ) произведен по формуле 1, а результаты представлены в таблице 4.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}. \quad (1)$$

Таблица 4

Матрица вероятностей  $P$

Вариант	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Y1	0,221	0,061	0,064	0,213	0,213	0,047
Y2	0,139	0,142	0,168	0,130	0,088	0,113
Y3	0,174	0,132	0,100	0,165	0,213	0,113
Y4	0,105	0,173	0,146	0,083	0,138	0,160
Y5	0,081	0,195	0,164	0,071	0,113	0,173
Y6	0,093	0,191	0,168	0,095	0,125	0,177
Y7	0,070	0,201	0,173	0,059	0,100	0,183

Составлено автором

Расчет энтропии для каждого критерия проводим по формуле:

$$e_j = -k \times \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln p_{ij}) \quad (2)$$

где:  $k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 7} \approx 0,513$ . (3)

$e_1 = -0,513 \times (-1,748) = 0,896$ ;  $e_2 = -0,513 \times (-1,778) = 0,912$ ;

$e_3 = -0,513 \times (-1,758) = 0,902$ ;  $e_4 = -0,513 \times (-1,745) = 0,895$ ;

$e_5 = -0,513 \times (-1,748) = 0,896$ ;  $e_6 = -0,513 \times (-1,716) = 0,880$ .

Расчет степени отклонения энтропии  $d_j$ :

$$d_j = 1 - e_j, \quad (4)$$

$d_1 = 1 - 0,896 = 0,104$ ;  $d_2 = 1 - 0,912 = 0,088$ ;  $d_3 = 1 - 0,902 = 0,098$ ;

$d_4 = 1 - 0,895 = 0,105$ ;  $d_5 = 1 - 0,896 = 0,104$ ;  $d_6 = 1 - 0,880 = 0,120$ .

Расчет весовых коэффициентов  $\omega_j$  производим по формуле:

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} = \frac{d_j}{0,619}. \quad (5)$$

Итоговые веса критериев:

$$\omega_1 (\text{ЭЭ}) = 0,104/0,619 = 0,168; \omega_2 (\text{НС}) = 0,088/0,619 = 0,142;$$

$$\omega_3 (\text{Д}) = 0,098/0,619 = 0,158; \omega_4 (\text{ТС}) = 0,105/0,619 = 0,170;$$

$$\omega_5 (\text{ЭК}) = 0,104/0,619 = 0,168; \omega_6 (\text{Сейсм}) = 0,120/0,619 = 0,194.$$

Проверка сумм весов:

$$\sum_{j=1}^6 \omega_j = 0,168 + 0,142 + 0,158 + 0,170 + 0,168 + 0,194 = 1,000. \quad (6)$$

Результаты расчета энтропии, отклонений и весов — в таблице 5.

Анализ начинаем с формирования эталонной последовательности:

$$X_0 = (\max X_1, \max X_2, \max X_3, \max X_4, \max X_5, \max X_6). \quad (7)$$

$$X_0 = (0,95; 0,99; 0,95; 0,25; 0,85; 0,97). \quad (8)$$

Для критериев  $\max$  и  $\min$ :

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_j}; \quad x'_{ij} = \frac{\min x_j}{x_{ij}}. \quad (9)$$

Таблица 5

Результаты расчета весов

Критерий	Энтропия ( $e_j$ )	Отклонение ( $d_j$ )	Вес ( $\omega_j$ )
$X_1$ (ЭЭ)	0,896	0,104	0,168
$X_2$ (НС)	0,912	0,088	0,142
$X_3$ (Д)	0,902	0,098	0,158
$X_4$ (ТС)	0,895	0,105	0,170
$X_5$ (ЭК)	0,896	0,104	0,168
$X_6$ (Сейсм)	0,880	0,120	0,194

Составлено автором

Нормализованная матрица  $R$  представлена в таблице 6.

Таблица 6

Нормализованные матрица  $R$

Вариант укрепления	ЭЭ, $X_1$	НС, $X_2$	Д, $X_3$	ТС, $X_4$	ЭК, $X_5$	Сейсм., $X_6$
Эталон $X_0$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Уположение откосов	1,000	0,303	0,368	0,278	1,000	0,258
Бетонные стены	0,632	0,707	0,968	0,455	0,412	0,619
Габрионные стены	0,789	0,657	0,579	0,357	1,000	0,619
Свайные сооружения	0,474	0,859	0,842	0,714	0,647	0,876
Свайно-анкерные сооружения	0,368	0,970	0,947	0,833	0,529	0,948
Плитно-анкерные сооружения	0,421	0,949	0,968	0,625	0,588	0,969
Комбинированные	0,316	1,000	1,000	1,000	0,471	1,000

Составлено автором

Расчет матрицы разностей  $\Delta$  производим по формуле 10. Результаты приведены в таблице 7.

$$\Delta_{ij} = |x'_{0j} - x'_{ij}|. \quad (10)$$

Таблица 7

Расчет разностей  $\Delta_{ij}$

Вариант укрепления	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$	$\Delta_6$
Уположение откосов	0,000	0,697	0,632	0,722	0,000	0,742
Бетонные стены	0,368	0,293	0,032	0,545	0,588	0,381
Габионные стены	0,211	0,343	0,421	0,643	0,000	0,381
Свайные сооружения	0,526	0,141	0,158	0,286	0,353	0,124
Свайно-анкерные сооружения	0,632	0,030	0,053	0,167	0,471	0,052
Плитно-анкерные сооружения	0,579	0,051	0,032	0,375	0,412	0,031
Комбинированные	0,684	0,000	0,000	0,000	0,529	0,000

Составлено автором

Далее рассчитываем коэффициенты реляционной связи  $\xi$ .

$$\Delta_{\min} = \min(\min \Delta_{ij}) = 0,000; \Delta_{\max} = \max(\max \Delta_{ij}) = 0,742. \quad (11)$$

$$\lambda \cdot \Delta_{\max} = 0,5 \cdot 0,742 = 0,371, \quad (12)$$

где:

$\lambda = 0,5$  (коэффициент различия).

Коэффициенты серой корреляции определяются по формуле 13. Результаты расчетов представлены в таблице 8.

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \lambda \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \lambda \Delta_{\max}} = \frac{0,371}{\Delta_{ij} + 0,371}. \quad (13)$$

Таблица 8

Результаты расчета коэффициентов реляционной связи  $\gamma_{ij}$

Вариант укрепления	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\xi_4$	$\xi_5$	$\xi_6$
Уположение откосов	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,70 + 0,371)} = 0,347$	$\frac{0,371}{(0,63 + 0,371)} = 0,370$	$\frac{0,371}{(0,72 + 0,371)} = 0,339$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,74 + 0,371)} = 0,333$
Бетонные стены	$\frac{0,371}{(0,37 + 0,371)} = 0,502$	$\frac{0,371}{(0,29 + 0,371)} = 0,559$	$\frac{0,371}{(0,03 + 0,371)} = 0,920$	$\frac{0,371}{(0,55 + 0,371)} = 0,405$	$\frac{0,371}{(0,59 + 0,371)} = 0,387$	$\frac{0,371}{(0,38 + 0,371)} = 0,493$
Габионные стены	$\frac{0,371}{(0,21 + 0,371)} = 0,638$	$\frac{0,371}{(0,34 + 0,371)} = 0,520$	$\frac{0,371}{(0,42 + 0,371)} = 0,469$	$\frac{0,371}{(0,64 + 0,371)} = 0,366$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,38 + 0,371)} = 0,493$
Свайные сооружения	$\frac{0,371}{(0,53 + 0,371)} = 0,414$	$\frac{0,371}{(0,14 + 0,371)} = 0,725$	$\frac{0,371}{(0,16 + 0,371)} = 0,701$	$\frac{0,371}{(0,29 + 0,371)} = 0,565$	$\frac{0,371}{(0,35 + 0,371)} = 0,513$	$\frac{0,371}{(0,12 + 0,371)} = 0,749$
Свайно-анкерные сооружения	$\frac{0,371}{(0,63 + 0,371)} = 0,370$	$\frac{0,371}{(0,03 + 0,371)} = 0,925$	$\frac{0,371}{(0,05 + 0,371)} = 0,875$	$\frac{0,371}{(0,17 + 0,371)} = 0,690$	$\frac{0,371}{(0,47 + 0,371)} = 0,441$	$\frac{0,371}{(0,05 + 0,371)} = 0,877$
Плитно-анкерные сооружения	$\frac{0,371}{(0,58 + 0,371)} = 0,391$	$\frac{0,371}{(0,05 + 0,371)} = 0,879$	$\frac{0,371}{(0,03 + 0,371)} = 0,920$	$\frac{0,371}{(0,38 + 0,371)} = 0,497$	$\frac{0,371}{(0,41 + 0,371)} = 0,474$	$\frac{0,371}{(0,03 + 0,371)} = 0,923$
Комбинированные сооружения	$\frac{0,371}{(0,68 + 0,371)} = 0,352$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$	$\frac{0,371}{(0,53 + 0,371)} = 0,412$	$\frac{0,371}{(0,00 + 0,371)} = 1,000$

Составлено автором

Для определения итогового рейтинга альтернатив рассчитываем интегральные показатели:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n (\omega_j \times \xi_{ij}). \quad (14)$$

Расчет  $\gamma_i$  для каждого варианта укрепления:

1. Уположение откосов:  $\gamma_1 = 0,168 \times 1,000 + 0,142 \times 0,347 + 0,158 \times 0,370 + 0,170 \times 0,339 + 0,168 \times 1,000 + 0,194 \times 0,333 = 0,168 + 0,049 + 0,058 + 0,058 + 0,168 + 0,065 = 0,566$ .
2. Бетонные стены:  $\gamma_2 = 0,168 \times 0,502 + 0,142 \times 0,559 + 0,158 \times 0,920 + 0,170 \times 0,405 + 0,168 \times 0,387 + 0,194 \times 0,493 = 0,084 + 0,079 + 0,145 + 0,069 + 0,065 + 0,096 = 0,538$ .
3. Габрионные стены:  $\gamma_3 = 0,168 \times 0,638 + 0,142 \times 0,520 + 0,158 \times 0,469 + 0,170 \times 0,366 + 0,168 \times 1,000 + 0,194 \times 0,493 = 0,107 + 0,074 + 0,074 + 0,062 + 0,168 + 0,096 = 0,581$ .
4. Свайные сооружения:  $\gamma_4 = 0,168 \times 0,414 + 0,142 \times 0,725 + 0,158 \times 0,701 + 0,170 \times 0,565 + 0,168 \times 0,513 + 0,194 \times 0,749 = 0,070 + 0,103 + 0,111 + 0,096 + 0,086 + 0,145 = 0,611$ .
5. Свайно-анкерные сооружения:  $\gamma_5 = 0,168 \times 0,370 + 0,142 \times 0,925 + 0,158 \times 0,875 + 0,170 \times 0,690 + 0,168 \times 0,441 + 0,194 \times 0,877 = 0,062 + 0,131 + 0,138 + 0,117 + 0,074 + 0,170 = 0,692$ .
6. Плитно-анкерные сооружения:  $\gamma_6 = 0,168 \times 0,391 + 0,142 \times 0,879 + 0,158 \times 0,920 + 0,170 \times 0,497 + 0,168 \times 0,474 + 0,194 \times 0,923 = 0,066 + 0,125 + 0,145 + 0,084 + 0,080 + 0,179 = 0,679$ .
7. Комбинированные сооружения:  $\gamma_7 = 0,168 \times 0,352 + 0,142 \times 1,000 + 0,158 \times 1,000 + 0,170 \times 1,000 + 0,168 \times 0,412 + 0,194 \times 1,000 = 0,059 + 0,142 + 0,158 + 0,170 + 0,069 + 0,194 = 0,792$ .

Итоговое ранжирование вариантов укрепления представлено в таблице 9.

Таблица 9

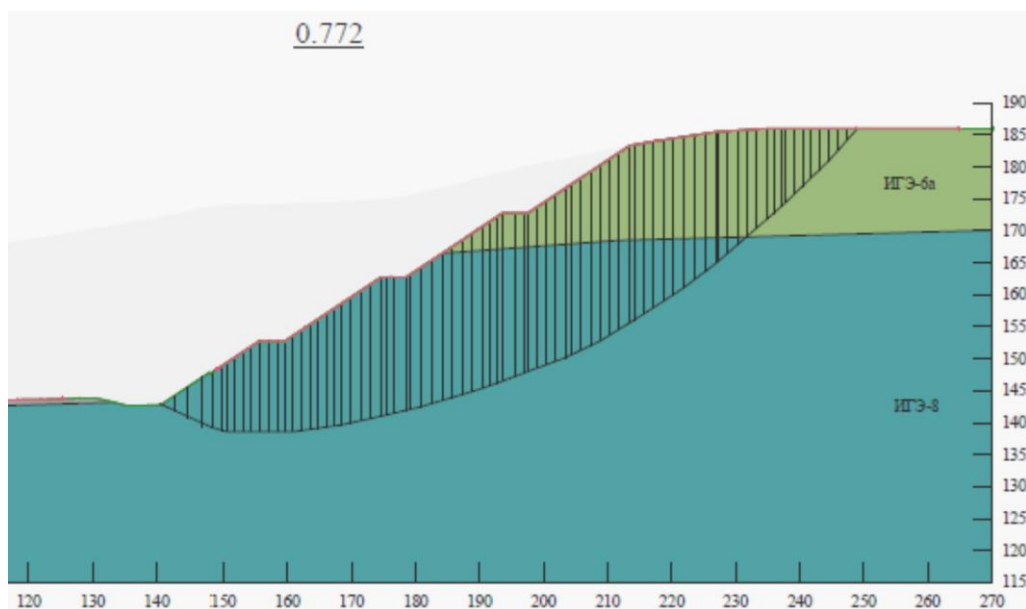
### Итоговое ранжирование вариантов укрепления склона

Вариант укрепления	$\gamma_i$	Ранг	Рекомендации
Комбинированные сооружения	0,763	1	Оптимальный вариант
Свайно-анкерные сооружения	0,698	2	Хорошая альтернатива
Плитно-анкерные сооружения	0,691	3	Хорошая альтернатива
Свайные сооружения	0,598	4	Резервный вариант
Габрионные стены	0,549	5	Малопригоден
Бетонные стены	0,533	6	Малопригоден
Уположение откосов	0,485	7	Нерекомендуем

Составлено автором

Анализ результатов расчетов показал, что преимущества уположения откосов по экономичности ( $\xi_1 = 1,000$ ) и простоте выполнения. Однако этот способ имеет очень низкие остальные показатели. Расчеты устойчивости показали, что для необходимых уклонов откоса территории, которые необходимо срезать вверх по склону, достигают более 120 м. С учетом сейсмичности территории (9 баллов) надежность и безопасность не обеспечиваются (рис. 1). Из сельскохозяйственного использования исключаются десятки гектаров земель. Кроме того, при эксплуатации важным становится фактор длины откоса и влияние связанных с подрезками процессов разуплотнения и увлажнения грунтов.

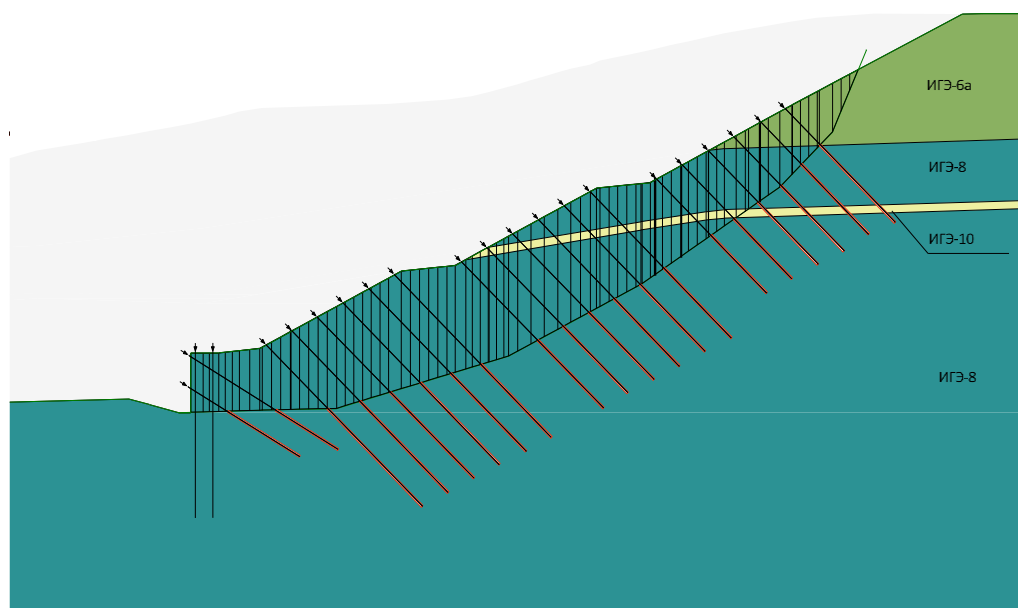
Габрионные стены имеют лучшую экологичность ( $\xi_5 = 1,000$ ), но уступают по остальным параметрам. Бетонные подпорные стены при таких консолях получаются очень массивными, трудоемкими при производстве работ и дорогими. Хорошими альтернативными вариантами являются свайно-анкерные и плитно-анкерные ( $\gamma_i = 0,698$  и  $\gamma_i = 0,691$ , соответственно).



*Рисунок 1. Расчет устойчивости на участке 2 при улоложении и террасировании склона*

Комбинированные (свайно-анкерные и плитно-анкерные) системы обеспечивают оптимальный баланс технических характеристик для глубоких выемок по параметрам долговечности и максимальной несущей способности ( $\xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_6 = 1,000$ ), в т. ч. в условиях сейсмике. Наибольший величина интегрального показателя ( $\gamma_i = 0,763$ ) по сравнению с остальными говорит о том, что на участке 2 наиболее рациональным будет этот вариант укрепления.

Выбор и расположение защитных сооружений очень важны при стабилизации оползневых подвижек. При учете прочностных характеристик грунта, полученных испытаниями «плашка по плашке» проектным является сочетание свайно-анкерного и плитно-анкерного сооружений при достаточно пологих откосах (более 100 м по длине склона (рис. 2)). Обоснованное применение характеристик грунта, полученных неконсолидированным срезом, позволило запроектировать сооружение, представленное на рисунке 3.



*Рисунок 2. Расчетная схема 1-го варианта противооползневых сооружений на участке 2*

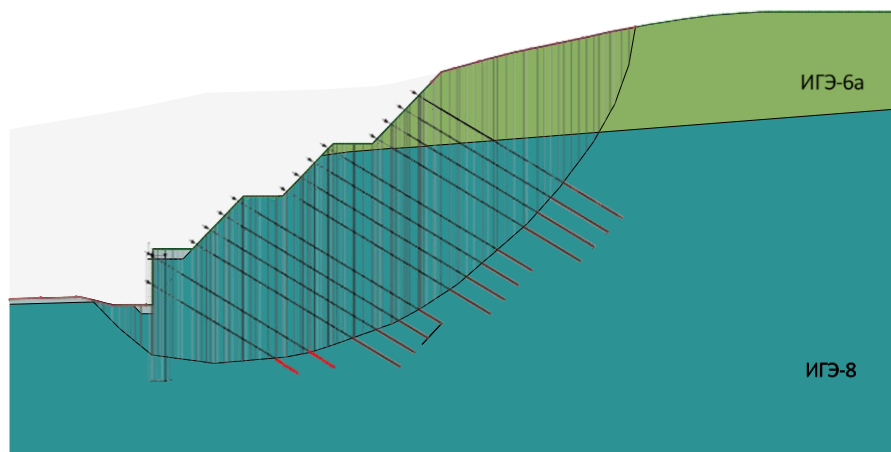


Рисунок 3. Расчетная схема 2-го варианта противооползневых сооружений на участке 2

Таблица 10

**Технико-экономические показатели мероприятий инженерной защиты на участке трассы «Таврида» ПК51 + 88,65 — ПК53 + 95,32**

№ п/п	Наименование вида работ	Ед. изм.	Ед. расценка, тыс. руб.	Расчетная схема 1		Расчетная схема 2	
				объем	стоимость, тыс. руб.	объем	стоимость, тыс. руб.
1	Земляные работы	м <sup>3</sup>	0,107	967 773	103 668	395 223	42 336
2	Устройство буронабивных свай Ø1 000 мм	м <sup>3</sup>	30,014	10 583	317 650	9 213	276 512
3	Устройство буронабивных свай Ø1 200 мм	м <sup>3</sup>	28,134	11 480	323 004	—	—
4	Устройство монолитных ж/б ростверков	м <sup>3</sup>	10,931	6 442	70 420	2 593	28 340
5	Устройство монолитных ж/б фундаментных балок	м <sup>3</sup>	18,368	746	13 704	541	9 933
6	Устройство монолитных ж/б стен	м <sup>3</sup>	17,805	556	9 964	406	7 222
7	Устройство монолитных ж/б облицовочных панелей	м <sup>3</sup>	15,465	5 521	85 389	4 002	61 892
8	Дренаж	м <sup>2</sup>	2,857	11 939	34 110	8 653	24 722
9	Устройство анкерных свай Titan 73/53	м.п.	7,596	41 412	314 567	36 120	274 369
10	Устройство анкерных свай Titan 103/51	м.п.	17,902	54 372	973 346	—	—
11	Устройство монолитных ж/б плит	м <sup>3</sup>	12,582	18 561	233 523	1 617	20 345
12	Устройство вентилируемых фасадов	м <sup>2</sup>	5,858	18 094	105 997	13 115	76 825
13	Противоэрозионная защита откосов	м <sup>2</sup>	4,458	19 439	86 666	37 405	166 766
14	Итого:			2 672 008		989 262 (снижение на 63 %)	

Составлено автором



Рисунок 4. Противооползневое сооружение на участке 2 (ПК52 + 22,01 — ПК53 + 95,32) трассы «Таврида» (общий вид) (фото автора)

Технико-экономическое сравнение рассмотренных вариантов представлено в таблице 10. Рациональное проектирование, выполненное на основе серого реляционного анализа, позволило снизить стоимость защитных мероприятий на 63 % (1 683 746 тыс. руб.).

Расчитанные и запроектированные плитно-анкерные и свайно-анкерные сооружения для инженерной защиты автомобильной трассы «Таврида» от оползневой опасности получили положительное заключение Главгосэкспертизы РФ, построены и в настоящее время успешно эксплуатируются (рис. 4 и 5).



*Рисунок 5. Элементы плитно-анкерного противооползневого сооружения на участке 2 (ПК52 + 22,01 — ПК53 + 95,32) трассы «Таврида» (фото автора)*

### Выводы

1. При вариантном проектировании противооползневых мероприятий на трассе «Керчь — Феодосия — Белогорск — Симферополь — Бахчисарай — Севастополь («Таврида») для укрепления глубоких (до 37 метров) выемок применен серый реляционный анализ.
2. Были рассмотрены различные варианты инженерной защиты автомобильной дороги: уположение откосов до необходимых уклонов; устройство массивных бетонных подпорных стен; устройство габионных конструкций; укрепление свайными противооползневыми сооружениями; укрепление свайно-анкерными сооружениями; укрепление плитно-анкерными конструкциями; применение комбинированных (свайно-анкерных и плитно-анкерных) конструкций.
3. Основными критериями оценки серым реляционным анализом являлись: экономическая эффективность; несущая способность; долговечность; технологическая сложность; стойкость к динамическим нагрузкам.

4. В результате определена рациональность применения комбинированных (свайно-анкерных и плитно-анкерных) конструкций.
5. Сооружения построены и в настоящее время успешно эксплуатируются.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пшидаток, М.А. Разработка методики оценки надёжности, качества инженерной защиты для обеспечения устойчивости земляного полотна автомобильных дорог [Development of a methodology for assessing the reliability and quality of engineering protection to ensure the stability of highway roadbeds] / М.А. Пшидаток, С.И. Маций // Транспортные сооружения. — 2023. — Т. 10, № 4. — URL: <https://t-s.today/13SATS423.html> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.15862/13SATS423](https://doi.org/10.15862/13SATS423). — EDN: [XKTGWB](https://www.edn.net/XKTGWB).
2. Маций, В.С. Оценка эксплуатационной надёжности подпорных стен в рамках диагностики технического состояния автомобильных дорог Адыгейской Республики [Assessment of the operational reliability of retaining walls within the framework of technical condition diagnostics of highways in the Republic of Adygea] / В.С. Маций, А.И. Кацко, Д.И. Кацко // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы научно-технической конференции. — Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2022. — С. 327–335. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52693439> (дата обращения: 24.11.2025). — EDN: [ULPWA](https://www.edn.net/ULPWA).
3. Особенности моделирования габионных подпорных стен при инженерной защите автомобильных дорог на оползневых склонах [Features of modeling gabion retaining walls in engineering protection of highways on landslide slopes] / А.К. Рябухин, Д.В. Лейер, Ш.П. Тетер, М.С. Карпова // Транспортные сооружения. — 2019. — Т. 6, № 4. — С. 1. — URL: <https://t-s.today/01SATS419.html> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.15862/01SATS419](https://doi.org/10.15862/01SATS419). — EDN: [YLVKZH](https://www.edn.net/YLVKZH).
4. Маций, С.И. Свайно-анкерные противооползневые конструкции [Pile-anchor anti-landslide structures] / С.И. Маций, А.К. Рябухин. — Краснодар: КубГАУ, 2017. — 189 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42614772> (дата обращения: 24.11.2025). — ISBN: 978-5-00097-369-1. — EDN: [HVLMOF](https://www.edn.net/HVLMOF).
5. Рациональное проектирование свайно-анкерных конструкций [Rational design of pile-anchor structures] / С.И. Маций, М.С. Коломиец, А.К. Рябухин, Е.В. Безуглова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. — 2013. — № 41. — С. 160–163. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19042745> (дата обращения: 24.11.2025). — EDN: [QASNKR](https://www.edn.net/QASNKR).
6. Ma T., Javankhoshdel S. Loss of stability in geosynthetic-reinforced slopes / T. Ma, S. Javankhoshdel // E3S Web of Conferences. — 2024. — Т. 569. — Art. 17004. — С. 1–9. — URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/99/e3sconf\\_geoamericas2024\\_17004/e3sconf\\_geoamericas2024\\_17004.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/99/e3sconf_geoamericas2024_17004/e3sconf_geoamericas2024_17004.html) (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1051/e3sconf/202456917004](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456917004). — EDN: [XGEHLM](https://www.edn.net/XGEHLM).
7. Ruan J., Zhu W. Sensitivity analysis of influencing factors of building slope stability based on orthogonal design and finite element calculation / J. Ruan, W. Zhu // E3S Web of Conferences. — 2018. — Т. 53. — Art. 03076. — С. 1–3. — URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/28/e3sconf\\_icaer2018\\_03076/e3sconf\\_icaer2018\\_03076.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/28/e3sconf_icaer2018_03076/e3sconf_icaer2018_03076.html) (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1051/e3sconf/20185303076](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185303076).

8. Analysis of influencing factors of rainfall infiltration slope sensitivity based on grey relational analysis / C. Han, Y. Hao, K. Liu [et al.] // Polish Journal of Environmental Studies. — 2025. — Т. 34, № 1. — С. 671–679. — URL: <https://www.pjoes.com/Analysis-of-Influencing-Factors-of-Rainfall-nInfiltration-Slope-Sensitivity-nBased,186437,0,2.html> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.15244/pjoes/186437](https://doi.org/10.15244/pjoes/186437). — EDN: [ARYSQV](https://www.edn.net/ARYSQV).
9. Aril A., Tetsuya K., Yoshinori S. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia / A. Aril, K. Tetsuya, S. Yoshinori // Geomorphology. — 2018. — Т. 318. — С. 101–111. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X16304470> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1016/j.geomorph.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.006). — EDN: [YHTVVB](https://www.edn.net/YHTVVB).
10. Liu Y., Du J.L., Wang Y.H. An improved grey group decision-making approach / Y. Liu, J.L. Du, Y.H. Wang // Applied Soft Computing Journal. — 2019. — Т. 76. — С. 78–88. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494618306987?via%3Dihub> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1016/j.asoc.2018.12.010](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.010).
11. Deng J.L. Control problems of grey systems / J.L. Deng // Systems & Control Letters. — 1982. — Т. 1, № 5. — С. 288–294. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016769118280025X> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1016/s0167-6911\(82\)80025-x](https://doi.org/10.1016/s0167-6911(82)80025-x).
12. Mat Deris A., Solemon B., Taha H., Che Omar R. Determination of influencing factors for slope stability using grey relational analysis (GRA) technique / A. Mat Deris, B. Solemon, H. Taha, R. Che Omar // Systematic Reviews in Pharmacy. — 2020. — Т. 11, № 4. — С. 202–206. — URL: <https://www.sysrevpharm.org/articles/determination-of-influencing-factors-for-slope-stability-using-grey-relational-analysis-gra-technique.pdf> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.31838/srp.2020.4.29](https://doi.org/10.31838/srp.2020.4.29).
13. Sensibility analysis of the wen zhutang landslide stability based on grey correlation analysis / C. Xin, N. Lei, M. Wenfei, Z. Min // International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015). — Atlantis Press, 2015. — С. 1302–1307. — URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/asei-15/25836665> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.2991/asei-15.2015.256](https://doi.org/10.2991/asei-15.2015.256).
14. Deformation viscosity effect and stability influencing factors sensitivity analysis of slope with soft interlayer / L. Xiangang, D. Hailong, X. Zhihan [et al.] // Indian Geotechnical Journal. — 2025. — С. 1–10. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40098-025-01247-x> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1007/s40098-025-01247-x](https://doi.org/10.1007/s40098-025-01247-x). — EDN: [PSAYNQ](https://www.edn.net/PSAYNQ).
15. Ye S., Huang A. Sensitivity analysis of factors affecting stability of cut and fill multistage slope based on improved grey incidence model / S. Ye, A. Huang // Soil Mechanics. — 2020. — Т. 57. — С. 8–17. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11204-020-09631-w> (дата обращения: 24.11.2025). — DOI: [10.1007/s11204-020-09631-w](https://doi.org/10.1007/s11204-020-09631-w). — EDN: [VUQGHY](https://www.edn.net/VUQGHY).
16. Методы расчета противооползневых сооружений на сейсмическое воздействие [Methods for calculating anti-landslide structures under seismic impact] / С.И. Маций, О.Ю. Ещенко, Н.Н. Любарский [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2024. — № 5. — С. 2–7. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74623811> (дата обращения: 24.11.2025). — EDN: [HEIJJJ](https://www.edn.net/HEIJJJ).

**Matsiy Vladimir Sergeevich**

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

E-mail: [matsiy02@gmail.com](mailto:matsiy02@gmail.com)

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

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1120320](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1120320)

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

## Selecting a method for strengthening a landslide-prone slope using gray relational analysis

**Abstract.** This article examines the application of gray relational analysis to selecting a method for stabilizing deep (up to 37 meters) soil excavations during the construction of the Kerch-Feodosia-Belogorsk-Simferopol-Bakhchisaray-Sevastopol («Tavrida») highway in challenging terrain. The author studied the soil conditions and the distribution of aquifers along the most challenging sections of the route. The study area was identified as being susceptible to the following potential adverse exogenous processes: development of landslide foci during slope undercutting; creep development; erosion; waterlogging and soil weathering. This necessitated a detailed, alternative design of landslide prevention measures. The author considered various options for engineering protection of the highway: slope alignment to the required slopes; construction of massive concrete retaining walls; construction of gabion structures; reinforcement with pile anti-landslide structures; Strengthening with pile-anchor structures; strengthening with slab-anchor structures; use of combined (pile-anchor and slab-anchor) structures. The main criteria in the evaluation using gray relational analysis were: economic efficiency; load-bearing capacity; durability; technological complexity; resistance to seismic loads. Relational coefficients were calculated and integral indicators were determined for all measures. Based on the final ranking of slope strengthening options, the feasibility of using combined (pile-anchor and slab-anchor) structures was determined. A technical and economic comparison of the considered options based on gray relational analysis made it possible to design the most reliable structures, which have been built and are currently successfully operated.

**Keywords:** highway; slopes; landslide; position; gray relational analysis; combined structures; seismicity