

Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 624.131.6:518.8; 625.7

© В. С. Матсий, аспирант
(Кубанский государственный аграрный
университет им. И. Т. Трубилина,
Краснодар, Россия)
E-mail: matsiy02@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-1-97-108

© V. S. Matsiy, post-graduate student
(Kuban State Agrarian University
named after I. T. Trubilin,
Krasnodar, Russia)
E-mail: matsiy02@gmail.com

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВ ОТКОСОВ СЕРЫМ РЕЛЯЦИОННЫМ АНАЛИЗОМ

REFINEMENT OF DESIGN SOIL PARAMETERS FOR SLOPES` SOIL USING GREY RELATIONAL ANALYSIS

Проведено геотехническое обследование аварийного участка на трассе автомобильной дороги М-7 «Волга». Установлены причины и механизм развития оползневых деформаций откосов. Выявлено систематическое расхождение между расчетными коэффициентами устойчивости и фактическим состоянием объекта. Показано, что метод серого реляционного анализа (GRA) позволяет количественно ранжировать факторы влияния (прочностные характеристики по слоям, уровень грунтовых вод) и выявлять наиболее критические параметры. Разработана и апробирована методика уточнения расчетных параметров откосов, которая позволила обосновать и реализовать рациональный комплекс защитных мероприятий.

Ключевые слова: оползень, откосы, серый реляционный анализ.

A geotechnical survey was conducted at an emergency section of the M-7 «Volga» highway. The causes and mechanism of landslide-induced slope deformations were established. A systematic discrepancy was identified between calculated stability factors and the actual condition of the structure. It has been demonstrated that the Grey Relational Analysis (GRA) method allows for the quantitative ranking of influencing factors (strength characteristics by layer, groundwater level) and the identification of the most critical parameters. A methodology for refining slope design parameters has been developed and tested, which enables the justification and implementation of a rational set of protective measures.

Keywords: landslide, slopes, Grey Relational Analysis (GRA).

Введение

Трассирование автомобильных дорог в пересеченной местности неизбежно приводит к формированию глубоких выемок с искусственными откосами. Ключевой задачей геотехнического проектирования является определение оптимальной крутизны этих откосов: чрезмерно крутые склоны несут риск оползневых деформаций, а излишне пологие — приводят к неоправданному увеличению объемов земляных работ и изъятию

значительных площадей земель из хозяйственного использования. На устойчивость откосов влияет множество факторов (прочностные характеристики грунтов, гидрогеологические условия, внешние нагрузки), степень влияния которых различна и может быть определена методами анализа чувствительности. Это позволяет проектировщикам количественно оценивать риски и принимать технически обоснованные, экономически эффективные и безопасные решения.

Оползневые подвижки на откосах автомобильной дороги

Аварийный участок расположен в Нижнекамском районе Республики Татарстан на трассе автомобильной дороги М-7 «Волга» (Москва–Уфа). В 2023 г. в процессе строительства выполнялась глубокая выемка грунта объемами от 6 до 17 м, причем до осени 2023 г. видимых признаков потери устойчивости не наблюдалось. Критическая активизация произошла в марте–мае 2024 г., когда сформировались два активных консеквентных оползня скольжения: циркуобразные в плане, шириной ~130 м, длиной ~40 м. В результате на участке образовался консеквентный оползень скольжения (рис. 1) с бровкой срыва высотой 1–5 м, сложенной полутвердыми и тугопластичными суглинками с прослоями песка. Дополнительно откос подвергся множественным вторичным оползневым деформациям, вызванным локальным обводнением участков.

Прочностные показатели грунтового массива подвержены временным изменениям. Параллельно происходили два разнонаправленных процесса: консолидация грунта и его

разуплотнение, способное вызвать внезапное обрушение откоса, внезапную потерю устойчивости, характерную для глинистых грунтов и обусловленную временным снижением их прочности. На ухудшение механических характеристик влияли процессы выветривания, техногенные воздействия, дополнительное насыщение влагой, циклические температурно-влажностные воздействия (набухание–усадка, замерзание–оттаивание). Эти процессы привели к критическому снижению прочности и нарушению сплошности грунтовой толщи.

В период проведения строительных работ (январь–март) склоны выемки не имели противоэрозионной защиты, что послужило ключевым фактором активизации процессов эрозии и выветривания. Формирование зон напряженно-деформированного состояния в грунтовой толще было вызвано техногенными факторами, включавшими искусственное регулирование уровня грунтовых вод, механическое давление от грунтовых отвалов и строительной техники, динамические нагрузки от эксплуатации механизмов.



Рис. 1. Оползень на участке ПК224–ПК225 автомобильной дороги М-7 «Волга». Фото автора

Совокупное влияние природных и техногенных условий привело к появлению выемки предельного состояния с образованием отрывной трещины. Следовательно, деформации склонов возводимой выемки стали результатом комплексного воздействия следующих факторов:

- отсутствие защитных инженерных мероприятий в строительный период;
- игнорирование рекомендаций по защите склонов от атмосферных осадков;
- интенсивное развитие неблагоприятных геологических процессов на незащищенных участках выемки;
- вибрационное воздействие строительного оборудования;
- техногенное изменение режима поверхностного стока и уровня грунтовых вод при производстве земляных работ;
- совпадение строительного периода с фазой активного снеготаяния, вызвавшей переувлажнение грунтов и формирование зон застоя поверхностных вод.

Оценка реальной устойчивости откосов и проектирование эффективных защитных мероприятий осложняются фундаментальной проблемой: трудностью достоверного определения расчетных физико-механических характеристик грунтов, соответствующих их состоянию в массиве.

Существующие методы имеют значительные ограничения:

- лабораторные испытания зачастую не моделируют реальные условия работы грунта (дренирование, масштабный эффект, нарушение структуры);
- полевые испытания (сдвиги, штампы) требуют больших трудозатрат, что ограничивает объем статистических данных;
- динамическое зондирование дает косвенные и недостаточно точные данные для прямого использования в расчетах;
- геофизические методы эффективны для качественного выявления зон разуплотнения и обводнения (рис. 2), но не обеспечи-

вают прямой количественной оценки прочностных параметров [1].

Распространенный камеральный метод «обратных расчетов» [2], при котором в расчетном сечении коэффициент устойчивости принимается равным 1, а прочностные параметры подбираются итерационно, имеет серьезные недостатки:

- неоднозначность решения, так как даже для однородного откоса одному значению $F_s = 1$ может соответствовать бесконечное число комбинаций c и φ ;
- в откосах со сложной геометрией (как на аварийном участке с чередованием ИГЭ 3а, 13, 13а, 12) задача становится многопараметрической и плохо обусловленной, что резко увеличивает погрешность;
- метод не позволяет адекватно учесть динамическое влияние уровня грунтовых вод (УГВ), являющегося ключевым фактором в данном случае.

Метод переходных коэффициентов, рекомендованный в ОДМ 218.2.006–2010¹ и разработанный для делювиально-оползневых грунтов [3], также не решает проблему в сложных условиях из-за ограниченной области применения (не охватывает все многообразие грунтов и факторов и не учитывает критического влияния гидрогеологического режима).

В данных условиях наиболее адекватным инструментом является серый реляционный анализ (GRA), который позволяет работать с неполными и разнородными данными; учитывать любое количество влияющих параметров (прочностные характеристики по слоям, УГВ, геометрию, техногенные воздействия); выявлять степень влияния каждого фактора на общую устойчивость.

Для анализа выбран характерный участок с оползневыми подвижками. На основе инженерно-геологических данных и результа-

¹ ОДМ 218.2.006–2010. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог. М.: ФГУП «Информавтодор», 2011. 115 с.

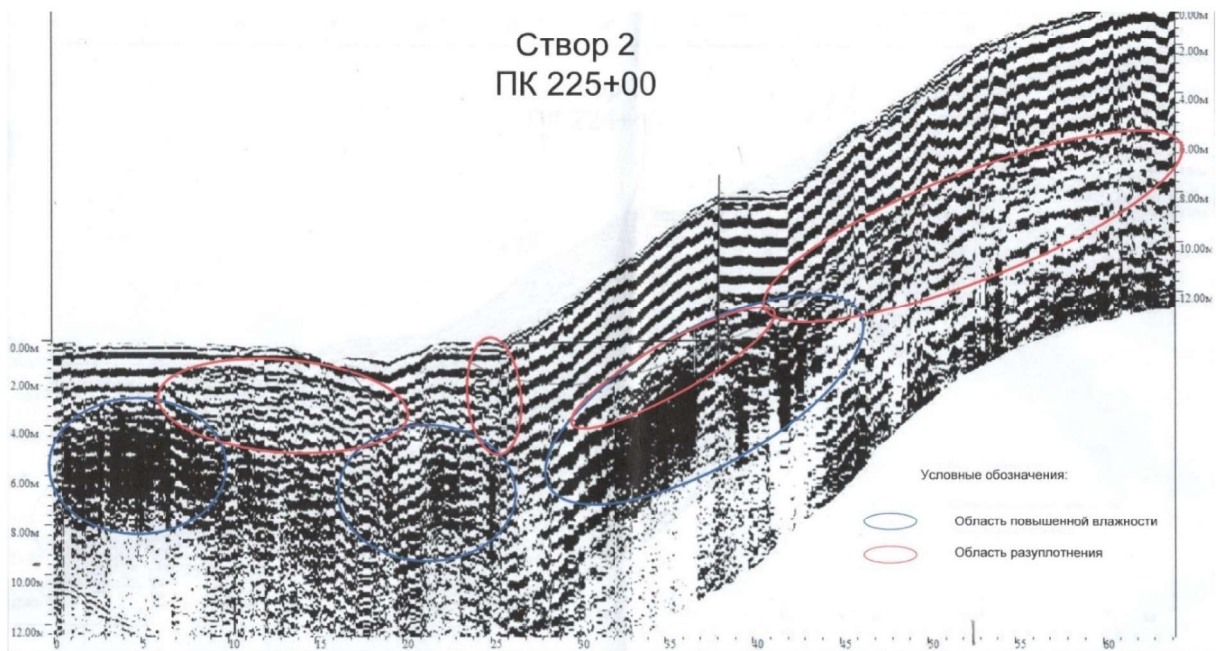


Рис. 2. Зоны разуплотнения и переувлажнения грунтов в откосе на ПК 225+00

тов геофизики выделены девять ключевых факторов: сцепление (c) и угол внутреннего трения (φ) для четырех ИГЭ (3а, 13, 13а, 12), а также уровень грунтовых вод как отдельный критический параметр. Исключены факторы: удельный вес грунта (γ) — ввиду его малого влияния [4]; геометрия откоса (зафиксирована: уклон 1:2, бермы 4 м); сейсмические нагрузки (отсутствуют).

На первом этапе прочностные характеристики были определены по методу переходных коэффициентов (табл. 1), а устойчивость рассчитана в *GeoStudio* (рис. 3). Результат ($F_s = 1,172$) не соответствует реальности, так как смещения произошли, что означает фактические значения $F_s < 1,0$ в момент аварии. Отсутствие выпоров грунта у подошвы откоса (см. рис. 1) указывает, что разрушение не было глубинным и не затрагивало толщу ИГЭ 12, что сужает круг возможных механизмов.

Проведенный анализ демонстрирует, что ни метод переходных коэффициентов, ни упрощенные обратные расчеты не способны адекватно описать поведение сложного

неоднородного откоса под влиянием переменного водного режима. Это обосновывает применение *GRA* для решения двух взаимосвязанных задач: определения набора редуцированных прочностных характеристик по слоям, соответствующих моменту потери устойчивости; ранжирования факторов по степени их влияния, что позволит обоснованно выбрать тип защитных мероприятий (например, приоритет дренажа над силовым укреплением, если влияние УГВ окажется максимальным).

Оценка чувствительности различных влияющих факторов

Для оценки влияния различных факторов на устойчивость откосов применяются современные методы анализа: искусственные нейронные сети, серый реляционный анализ (*GRA*), методы планирования экспериментов, нечеткая логика, аналитический иерархический процесс (*Analytic Hierarchy Process, AHP*) и методы анализа надежности [5–7]. Теория серых систем, предложенная Дэн Цзюйлином (*J. L. Deng*) в 1980-х годах, предназначена для работы с системами, имеющи-

Таблица 1

Расчетные значения свойств грунтов (схема испытаний — по переходным коэффициентам)

ИГЭ	Описание ИГЭ	Удельный вес, кН/м ³	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.
3а	Суглинок легкий, пылеватый, полутвердый, непросадочный	20	15	14
13	Песок пылеватый, средней плотности от маловлажного до водонасыщенного	20	5,5	17
13а	Супесь пластичная, продукт выветривания песчаника	20,2	9	17
12	Глина легкая, полутвердая, непросадочная, ненабухающая	19,2	29	12

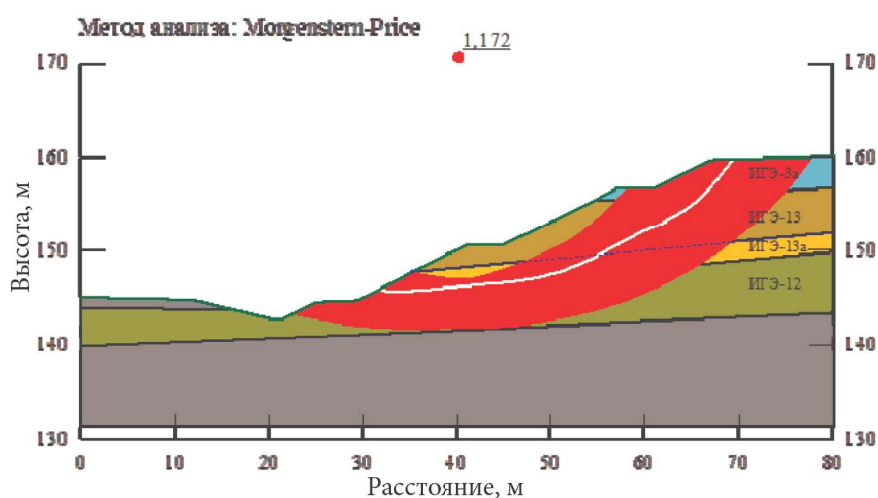


Рис. 3. Результаты расчета устойчивости выемки с выявленным УГВ, по расчетным значениям, полученным методом переходных коэффициентов; белая линия — критическая поверхность скольжения; красная зона — зона возможных поверхностей скольжения

ми неполную или частично определенную информацию («серые» системы) [8]. В отличие от «белых» (полностью определенных) или «черных» (неизвестных) систем, серый реляционный анализ позволяет выявлять взаимосвязи между факторами и определять наиболее значимые из них на основе ограниченных данных. Этот метод эффективен для многокритериальных задач со сложными взаимозависимостями, что характерно для геотехнических проблем.

Анализ выполняется путем сравнения эталонной последовательности X , составленной из варьируемых параметров, влияющих на устойчивость (сцепление c , угол

внутреннего трения φ , удельный вес грунта γ , высоту и крутизну откоса, уровень грунтовых вод), со сравниваемой последовательностью Y , представляющей собой коэффициенты устойчивости F_s , полученные при изменении каждого параметра. Метод вычисляет степень близости (реляционный коэффициент) каждой из сравниваемых последовательностей к эталону, что позволяет ранжировать факторы по степени их влияния на устойчивость. В матричной форме это можно представить в виде

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix};$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $x_{ij} = (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ — значение j -го параметра i -го фактора; $y_{ij} = (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ — соответствующий коэффициент устойчивости.

Коэффициенты взаимосвязи между элементами эталонной и сравниваемой последовательностей определяются по формуле

$$z_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x'_{ij} - y'_{ij}| + \lambda \cdot \max_i \max_j |x'_{ij} - y'_{ij}|}{|x'_{ij} - y'_{ij}| + \lambda \cdot \max_i \max_j |x'_{ij} - y'_{ij}|}. \quad (2)$$

Итоговый рейтинг определяется расчетом интегральных показателей:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n (w_j \times z_{ij}), \quad (3)$$

где w_j — искомый весовой коэффициент i -го фактора.

Результаты расчетов степени серой корреляции представлены на рис. 4.

Проведен обзор исследований по оценке чувствительности факторов в расчетах устойчивости откосов. Результаты, получен-

ные различными авторами, демонстрируют отсутствие универсальной иерархии значимости параметров, что подтверждает необходимость индивидуального анализа для каждого конкретного случая.

Сравнительный анализ результатов различных исследований:

- *Ruan* и *Zhu* [9] (МКЭ для однородного откоса) — ранжирование: $\varphi > H > c > \alpha > \gamma > E > \mu$;

- *A. M. Deris* и др. [10] (*GRA* для четырех склонов) — усредненный результат: $H > c > \gamma > \varphi > \alpha > r_u$. Отмечена возможность исключения малозначимых факторов для оптимизации прогноза;

- *X. Chai* и др. [11] (учет сейсмике) — ранжирование: $c > \varphi > \gamma > K_{\text{сейсм}}$. Подчеркнута роль мониторинга для повышения точности;

- *К. Кан, О. В. Зеркаль* [12] (вероятностный анализ): $\varphi > c > K_{\text{сейсм}} > \gamma$;

- *X. Liu* и др. [13] (влияние слабых прослоев): $\alpha > c > \varphi > H > \gamma$.

Разнообразие результатов подчеркивает, что значимость факторов полностью определяется спецификой инженерно-геологических условий и механизмами возможного

Серые реляционные коэффициенты

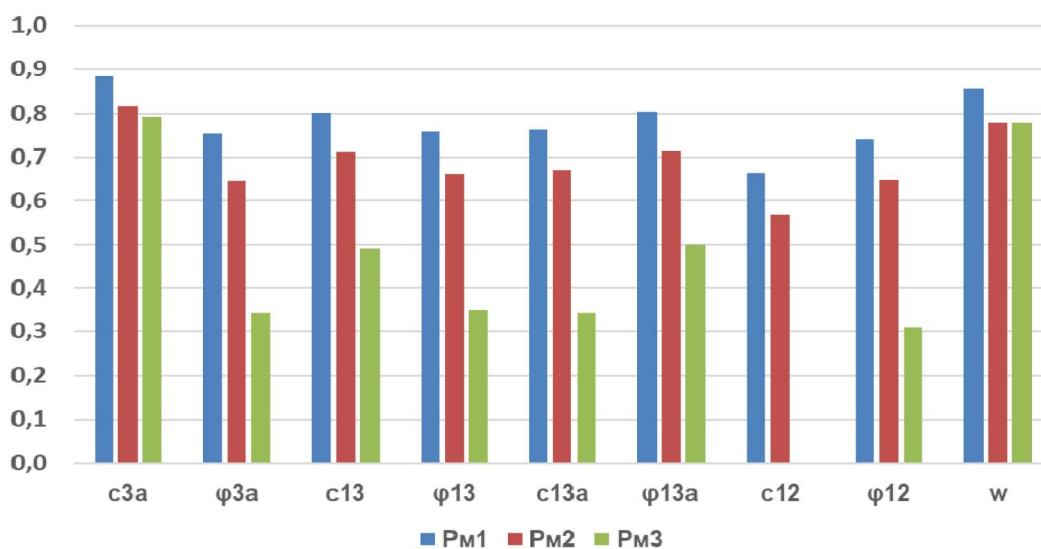


Рис. 4. Сравнение серых реляционных степеней различными методами

разрушения. Большинство исследований выполнено для однородных массивов, тогда как задача оценки устойчивости неоднородного многослойного откоса (как на аварийном участке автодороги М-7, сложенном суглинками, песками, супесью и глиной) является существенно более сложной, что повышает актуальность количественного анализа чувствительности.

Сравнение традиционного ($\lambda = 0,5$) и улучшенного ($\lambda = 0,272$) методов без учета весов показало, что порядок влияния факторов практически идентичен. Значения серой корреляции находятся в диапазонах 0,663–0,885 и 0,568–0,817 соответственно. Это указывает, что уточнение коэффициента λ без введения весовых коэффициентов улучшает лишь нормализацию данных, но не меняет качественных выводов о ранжировании факторов.

Результаты анализа по усовершенствованному взвешенному методу, полученные с учетом весовых коэффициентов факторов, демонстрируют принципиально иное качество: увеличивается дистанция между значениями степеней корреляции для разных факторов, что обеспечивает четкую дифференциацию по степени важности, позволяя однозначно выделить наиболее и наименее критичные параметры для устойчивости данного конкретного откоса.

Для сложных многослойных откосов в условиях неопределенности данных стандартные методы *GRA* (даже с уточненным λ) недостаточны. Применение усовершенствованного взвешенного метода является необходимым, так как только он позволяет:

- учесть разную физическую природу и значимость факторов (например, больший вес может быть назначен параметрам слабого прося, определяющего механизм разрушения);
- получить количественно обоснованное ранжирование для обоснования проектных решений (выбора между усилением, дренажом или изменением геометрии);

- оптимизировать программу дальнейших изысканий и мониторинга, сконцентрировав ресурсы на определении наиболее влиятельных параметров.

Традиционный серый реляционный анализ обладает существенным недостатком: он предполагает идентичный вес всех факторов и использует эмпирический коэффициент разрешения ($\lambda = 0,5$). В отличие от него, усовершенствованная взвешенная модель *GRA* адаптивно определяет веса факторов на основе фактических данных, что минимизирует субъективность и повышает точность оценки для сложных неоднородных геотехнических систем, подобных многослойному откосу автодороги. Анализ результатов позволяет количественно ранжировать факторы по их влиянию на устойчивость и верифицировать механизм аварии:

1. Критические факторы (реляционный коэффициент $> 0,75$): сцепление суглинка (ИГЭ 3а) 0,793; уровень грунтовых вод 0,779. Авария в первую очередь обусловлена сочетанием значительного снижения прочности суглинка в верхней части откоса (вследствие разуплотнения, выветривания, циклов замораживания–оттаивания) и критического подъема УГВ в период снеготаяния и осадков. Эти выводы полностью согласуются с данными геофизических исследований, выявившими зоны разуплотнения и переувлажнения.

2. Значимые факторы (реляционный коэффициент $\sim 0,5$): сцепление песка (ИГЭ 13) 0,491; угол внутреннего трения супеси (ИГЭ 13а) 0,500. Данные слои являются частью активной поверхности скольжения, что подтверждено визуальным обследованием. Их прочностные параметры требуют уточнения, но влияние умеренное.

3. Малозначимые факторы (реляционный коэффициент $\sim 0,34$): угол внутреннего трения суглинка (ИГЭ 3а), песка (ИГЭ 13) и сцепление супеси (ИГЭ 13а). Эти параметры не являются определяющими для механизма разрушения в данных условиях.

4. Незначимые факторы (реляционный коэффициент $< 0,31$): параметры полутвердой глины (ИГЭ 12) ~ 0 . Глинистый водоупор не был вовлечен в оползневой процесс, что опровергает гипотезу о глубоком скольжении и подтверждает поверхностный характер смещения.

На основе ранжирования предложена дифференцированная корректировка прочностных характеристик для последующего достоверного моделирования:

- существенное редуцирование: значительно снизить сцепление суглинка (ИГЭ 3а), повысить расчетный уровень грунтовых вод на 4 м относительно данных изысканий, проведенных после аварии, для моделирования пикового обводнения;

- умеренная корректировка: незначительно изменить сцепление песка и угол внутреннего трения супеси;

- минимальные изменения: незначительно понизить угол внутреннего трения суглинка, песка и сцепление супеси;

- сохранение параметров: принять прочностные характеристики глины (ИГЭ 12) по первоначальным данным.

Скорректированные характеристики приведены в табл. 2. Расчет устойчивости с их использованием (рис. 5) дает коэффициент устойчивости $F_s = 0,999$, что с высокой точностью соответствует моменту потери

устойчивости ($F_s \approx 1,0$). Форма и положение критической поверхности скольжения, полученные в модели, отлично коррелируют с данными натурного обследования, что подтверждает адекватность выявленного механизма разрушения и корректность предложенной методики коррекции параметров.

Рекомендации для инженерной практики

Таким образом, применение усовершенствованного взвешенного *GRA* позволило перейти от качественных гипотез к количественно обоснованной модели аварии. Результаты дают четкое основание для проектирования защитных мероприятий, которые должны быть направлены в первую очередь на повышение прочности поверхностного слоя (армирование, закрепление) и понижение уровня грунтовых вод (системный дренаж, организация поверхностного стока).

Предложена пошаговая методика использования серого реляционного анализа для повышения достоверности оценки устойчивости откосов автомобильных дорог и оптимизации проектных решений.

Этап 1. Формирование параметрической базы данных:

- исходный расчет устойчивости: выполнение расчетов по данным стандартных инженерно-геологических изысканий;

Таблица 2

Расчетные значения свойств грунтов (схема испытаний — по результатам серого реляционного анализа)

ИГЭ	Описание ИГЭ	Удельный вес, кН/м ³	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.
3а	Суглинок легкий, пылеватый, полутвердый, непросадочный	20	11	13,5
13	Песок пылеватый, средней плотности от маловлажного до водонасыщенного	20	4,5	16,5
13а	Супесь пластичная, продукт выветривания песчаника	20,2	8,5	15
12	Глина легкая, полутвердая, непросадочная, ненабухающая	19,2	29	11,5

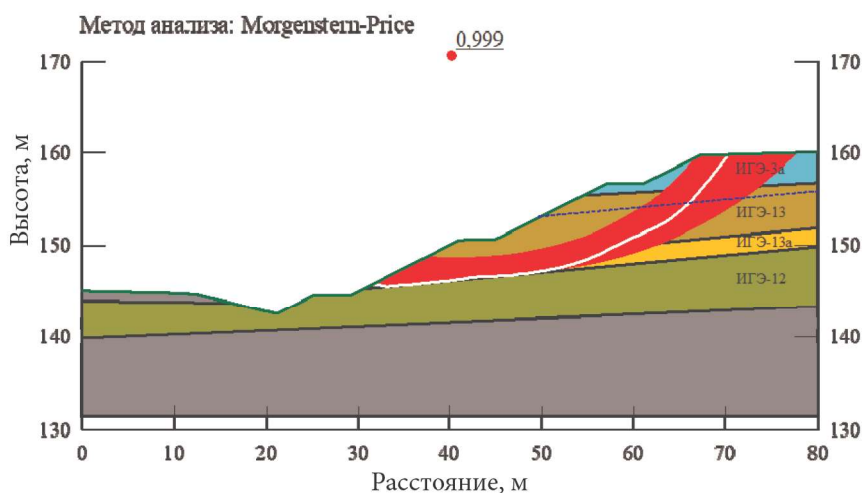


Рис. 5. Результаты расчета устойчивости выемки с использованием расчетных значений, полученных серым реляционным анализом; белая линия — критическая поверхность скольжения; красная зона — зона возможных поверхностей скольжения

- коррекция параметров: уточнение прочностных характеристик (c , φ) методами обратных расчетов (*back analysis*) и «переходных коэффициентов» для участков с наблюдаемыми смещениями;

- оценка неопределенности: определение реального разброса значений ключевых параметров (прочностные характеристики грунтов, уровень грунтовых вод) в массиве;

- параметрическое моделирование: выполнение серии расчетов устойчивости для различных комбинаций факторов с целью формирования выборки данных.

Этап 2. Подготовка данных для серого реляционного анализа:

- расчет парных корреляций: предварительный анализ линейной зависимости между каждым фактором и коэффициентом устойчивости (F_s);

- формирование матриц данных: матрица X (эталонная последовательность) — различные комбинации (сценарии) влияющих факторов (c , φ , ..., УГВ). Матрица Y (сравнительная последовательность) — соответствующие каждому сценарию значения коэффициента устойчивости (F_s);

- нормализация данных: безразмерная обработка матриц X и Y для получения сопоставимых последовательностей X' и Y' .

Этап 3. Выполнение серого реляционного анализа:

- расчет матрицы взаимосвязей: определение матрицы коэффициентов взаимосвязи Z между элементами эталонной и сравнительной последовательностей;

- определение векторных степеней сходства: расчет показателей α , β , γ , характеризующих геометрическую близость последовательностей;

- расчет весового коэффициента: определение коэффициента разрешения λ , оптимального для данной конкретной задачи (в отличие от стандартного $\lambda = 0,5$);

- расчет взвешенной степени серой корреляции: определение итоговых значений γ_i для каждого фактора с учетом его весового вклада.

Этап 4. Интерпретация результатов и верификация модели:

- анализ и корректировка: ранжирование факторов по степени влияния γ_i . На основе анализа производится дифференцированная коррекция исходных расчетных харак-

теристик грунтов: значительное снижение параметров для факторов с высоким γ_i и незначительное — для факторов с низким γ_i ;

- поверочный расчет: выполнение окончательного расчета устойчивости со скорректированными параметрами. Верификация модели достигается при значении $F_s \approx 1,0$ для участков с наблюдаемыми смещениями и соответствии формы поверхности скольжения данным обследования.

Результаты *GRA* позволяют рационально распределять ресурсы на изыскания:

- для критических факторов ($\gamma > 0,7$): требуются прямые высокоточные измерения. Рекомендуется: трехосные испытания, реометрия для глин, детальные гидрогеологические исследования, увеличенное количество образцов (> 10 на ИГЭ). На эти работы целесообразно направлять до 70 % бюджета изысканий;

- для значимых факторов ($0,4 \leq \gamma \leq 0,7$): допустимо применение косвенных методов. Рекомендуется: статическое зондирование (*Cone penetration test, CPT*), геофизические методы. Доля затрат — около 25 % бюджета;

- для второстепенных факторов ($\gamma \leq 0,4$): возможно использование типовых (справочных) значений или оценок по аналогии. Затраты минимальны — до 5 % бюджета.

Внедрение методики серого реляционного анализа в геотехническую практику позволяет перейти от детерминированных расчетов с субъективно выбранными параметрами к обоснованному количественному управлению неопределенностью. Это повышает надежность проектных решений по укреплению откосов и обеспечивает оптимизацию затрат на инженерные изыскания за счет концентрации усилий на определенных действительно значимых параметрах.

Выводы

1. Проведено геотехническое обследование аварийного участка на трассе автомобильной дороги М-7 «Волга» в Нижне-

камском районе Республики Татарстан, где в 2023 году реализовывались работы по устройству глубокой выемки. Установлены причины и механизм развития оползневых деформаций откосов.

2. Выполнен критический анализ материалов инженерно-геологических изысканий и проведены серии расчетов устойчивости откосов стандартными методами. Выявлено систематическое расхождение между расчетными коэффициентами устойчивости и фактическим состоянием объекта, что указывает на необходимость уточнения прочностных параметров грунтов.

3. Обоснована целесообразность применения серого реляционного анализа (*GRA*) для оценки устойчивости сложных многослойных откосов в условиях значительной неопределенности исходных данных. Показано, что метод *GRA* позволяет количественно ранжировать факторы влияния (прочностные характеристики по слоям, уровень грунтовых вод) и выявлять наиболее критические параметры.

4. Проведен комплексный серый реляционный анализ по оригинальному алгоритму с использованием специализированного программного обеспечения. На основе матриц расчетных данных определены степени серой корреляции для каждого фактора, что позволило установить их относительную значимость для устойчивости конкретного откоса.

5. Разработана и апробирована практическая методика уточнения расчетных параметров откосов на основе результатов *GRA*. Методика включает этап дифференцированной коррекции прочностных характеристик грунтов (редуцирование) с последующей верификацией модели. Корректировка производится пропорционально величине реляционного коэффициента: наибольшие поправки вносятся для факторов с высокой степенью влияния.

6. Внедрение разработанной методики в практику проектирования позволило

обосновать и реализовать рациональный комплекс защитных мероприятий на значительных по протяженности участках строящейся автомобильной дороги. Подход обеспечил баланс между надежностью и экономической эффективностью решений, позволив сконцентрировать ресурсы на нейтрализации ключевых выявленных рисков (подтопление, разупрочнение поверхностных слоев).

Библиографический список

1. Маций В. С., Кацко А. И., Кацко Д. И. Геофизический мониторинг опасных оползневых процессов на автомобильных дорогах Краснодарского края // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы науч.-техн. конф. Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 г. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, 2022. С. 339–347.

2. Фоменко И. К., Зеркаль О. В., Сироткина О. Н. Обратный расчет устойчивости склона на основе анализа чувствительности // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: материалы науч.-практ. конф. Москва, 13–14 апреля 2017 г. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 127–132.

3. Безуглова Е. В. Оползневая опасность и риск смещений грунтов на склонах: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар: КубГАУ, 2005. 209 с.

4. Hang C., Deng Y., Xi H., Zuyin Z. Sensitivity of influencing factors of slope stability based on the orthogonality analysis method // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 21. Bund. 15. Pp. 5013–5024.

5. Han C., Hao Y., Liu K., Zhao H., Chen W., Liu X. Analysis of influencing factors of rainfall infiltration slope sensitivity based on grey relational analysis // Polish Journal of Environmental Studies. 2025. Vol. 34 (1). Pp. 671–679. DOI 10.15244/pjoes/186437.

6. Aditian A., Kubota T., Shinohara Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia // Geomorphology. 2018. Vol. 318. Pp. 101–111.

7. Liu Y., Du J. L., Wang Y. H. An improved grey group decision-making approach // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 76. Pp. 78–88.

8. Deng J. L. Control problems of grey systems // Systems & Control Letters. 1982. Vol. 1 (5). Pp. 288–294.

9. Ruan J., Zhu W. Sensitivity analysis of influencing factors of building slope stability based on orthogonal design and finite element calculation // E3S Web of

Conferences. 3rd International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEEER 2018). 2018. Vol. 53. 03076. DOI 10.1051/e3sconf/20185303076.

10. Deris A. M., Solemon B., Taha H., Omar R. C. Determination of influencing factors for slope stability using grey relational analysis (GRA) technique // Systematic Reviews in Pharmacy. 2020. Vol. 11 (4). Pp. 202–206.

11. Chai X., Nie L., Mao W., Zhang M. Sensibility analysis of the Wen Zhutang landslide stability based on grey correlation analysis // International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015). Atlantis Press, 2015. Pp. 1302–1307.

12. Кан К., Зеркаль О. В. Применение вероятностного анализа при количественной оценке устойчивости склона // Инженерная геология. 2017. Т. 12, № 4. С. 18–27. DOI 10.25296/1993-5056-2017-4-18-26.

13. Liu X., Dong H., Xu Z., Zhou J., Huang X., Wu J. Deformation viscosity effect and stability influencing factors sensitivity analysis of slope with soft interlayer // Indian Geotechnical Journal. 2025. Pp. 1–10. DOI 10.1007/s40098-025-01247-x.

References

1. Matsiy V. S., Katsko A. I., Katsko D. I. *Geofizicheskiy monitoring opasnykh opolznevykh protsessov na avtomobil'nykh dorogakh Krasnodarskogo kraya* [Geophysical monitoring of hazardous landslide processes on the roads of the Krasnodar Region]. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii. Trudy nauch.-tekhn. konf. Novochoerkassk, 28–30 sentyabrya 2022 g.* [Soil mechanics in geotechnics and foundation engineering. Proceedings of the sci. and tech. conf. Novochoerkassk, September 28-30, 2022]. Novochoerkassk, YuRGPU (NPI) im. M. I. Platova Publ., 2022, pp. 339–347.

2. Fomenko I. K., Zerkal' O. V., Sirotkina O. N. *Obratniy raschet ustoychivosti sklona na osnove analiza chuvstvitel'nosti* [Inverse calculation of slope stability based on sensitivity analysis]. *Inzhenerno-geologicheskie zadachi sovremennosti i metody ikh resheniya. Trudy nauch.-prakt. konf. Moskva, 13–14 aprelya 2017 g.* [Engineering and geological problems of our time and methods for their solution. Proceedings of the sci.-practic. conf. Moscow, April 13-14, 2017]. Moscow, Geomarketing Publ., 2017, pp. 127–132.

3. Bezuglova E. V. *Opolznevaya opasnost' i risk smeshcheniy gruntov na sklonakh. Diss. kand. tekhn. nauk* [Landslide hazard and risk of soil displacement on slopes. PhD in Sci. Tech. diss.]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2005, 209 p.

4. Hang C., Deng Y., Xi H., Zuyin Z. Sensitivity of influencing factors of slope stability based on the

orthogonality analysis method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 21, bund. 15, pp. 5013–5024.

5. Han C., Hao Y., Liu K., Zhao H., Chen W., Liu X. Analysis of influencing factors of rainfall infiltration slope sensitivity based on grey relational analysis. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2025, vol. 34 (1), pp. 671–679. DOI 10.15244/pjoes/186437.

6. Aditian A., Kubota T., Shinohara Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. *Geomorphology*, 2018, vol. 318, pp. 101–111.

7. Liu Y., Du J. L., Wang Y. H. An improved grey group decision-making approach. *Applied Soft Computing*, 2019, vol. 76, pp. 78–88.

8. Deng J. L. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1982, vol. 1 (5), pp. 288–294.

9. Ruan J., Zhu W. Sensitivity analysis of influencing factors of building slope stability based on orthogonal design and finite element calculation. *E3S Web of Conferences. 3rd International Conference on Advances in Energy and Environment Research*

(ICAEEER 2018), 2018, vol. 53, 03076. DOI 10.1051/e3sconf/20185303076.

10. Deris A. M., Solemon B., Taha H., Omar R. C. Determination of influencing factors for slope stability using grey relational analysis (GRA) technique. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 2020, vol. 11 (4), pp. 202–206.

11. Chai X., Nie L., Mao W., Zhang M. Sensibility analysis of the Wen Zhutang landslide stability based on grey correlation analysis. *International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015)*. Atlantis Press, 2015, pp. 1302–1307.

12. Kan K., Zerkal' O. V. *Primenenie veroyatnostnogo analiza pri kolichestvennoy otsenke ustoychivosti sklona* [Application of probabilistic analysis in quantitative assessment of slope stability]. *Inzhenernaya geologiya – Engineering Geology*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 18–27. DOI 10.25296/1993-5056-2017-4-18-26.

13. Liu X., Dong H., Xu Z., Zhou J., Huang X., Wu J. Deformation viscosity effect and stability influencing factors sensitivity analysis of slope with soft interlayer. *Indian Geotechnical Journal*, 2025, pp. 1–10. DOI 10.1007/s40098-025-01247-x.