
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ/DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS,
BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43> EDN: FICKWE**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ НА КОСОГОРАХ**

Научная статья

Марьина М.В.¹, Каменчуков А.В.^{2,*}, Алексеева И.Д.³, Горшков Н.И.⁴, Квашук С.В.⁵²ORCID : 0000-0001-7997-3195;³ORCID : 0000-0001-5498-0401;^{1, 2, 3, 4} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация⁵ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (006641[at]togudv.ru)

Предложена: 05.06.2026; Принята: 02.10.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

Статья посвящена оценке устойчивости водопропускных труб, расположенных на крутых косогорных участках автомобильных дорог, и разработке мероприятий по повышению их надёжности. Актуальность исследования обусловлена высокой вероятностью сползания насыпи и размыва откосов на таких участках, что приводит к потере устойчивости сооружения. Рассмотрены причины оползнеобразования и основные методы оценки устойчивости склонов на основе метода конечных элементов. Для решения задач по оценке устойчивости сооружения использовались методы предельного равновесия (в том числе метод Шахунянца). Выполнена оценка склона в естественном состоянии и после применения проектных решений. Предложен вариант повышений устойчивости склона комбинированным методом: габионные конструкции в сочетании с инъекционными грунтовыми анкерами.

Ключевые слова: автомобильная дорога, геосреда, устойчивость склона, водопропускная труба, укрепления.**IMPROVING THE STABILITY OF CULVERT SLOPES ON THE HILLSIDES**

Research article

Marina M.V.¹, Kamenchukov A.V.^{2,*}, Alekseeva I.D.³, Gorshkov N.I.⁴, Kvashuk S.V.⁵²ORCID : 0000-0001-7997-3195;³ORCID : 0000-0001-5498-0401;^{1, 2, 3, 4} Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation⁵ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (006641[at]togudv.ru)

Suggested: 05.06.2026; Accepted: 02.10.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The article is devoted to assessing the stability of culverts located on steep, hillside sections of motorways and to developing measures to improve their reliability. The relevance of the research is due to the high probability of mound slippage and slope erosion in such sections, which leads to a loss of structural stability. The causes of landslide formation and the main methods for assessing slope stability based on the finite element method are examined. To solve the problems of assessing the stability of the structure, limit equilibrium methods (including the Shakhynants method) were used. An evaluation of the slope was carried out in its natural state and following the implementation of design solutions. A method for improving slope stability using a combined approach is suggested: mesh structures in combination with grouted soil anchors.

Keywords: motorway, geoenvironment, slope stability, culvert, reinforcements.**Введение**

Автомобильные дороги являются сложными линейными инженерно-техническими сооружениями предназначенным для обеспечения качественного и безопасного движения транспортных средств, перевозке грузов и пассажиров. Основными показателями, отвечающими за обеспечение потребительских эксплуатационных свойств дороги, являются прочность и ровность дорожного покрытия [1], [2]. На протяжении всего межремонтного срока службы данные показатели должны находиться на удовлетворительном уровне или выше, при этом не более 5% от площади или протяженности рассматриваемого участка дороги могут иметь значения прочности и (или) ровности ниже требуемых. Кроме этого, сложность проектирования и прогнозирования эксплуатационного состояния элементов автомобильных дорог обуславливается высокой степенью неоднородности прочностных характеристик материалов и грунтов, из которых состоит дорожная конструкция [3].

Наиболее сложными и ответственными элементами с точки зрения строительства и эксплуатации являются искусственные водопропускные сооружения [4], [5]. Мостовые сооружения в данной работе не рассматриваются, исследование направлено на оценку устойчивости водопропускных труб. Именно устойчивость водопропускных труб очень сильно зависит от качества проработки проектного решения, технологичности и профессионализма строительных работ. Особенно сложными участками являются трубы, расположенные на крутых косогорных участках

дороги, так как именно на этих участках может произойти сползание насыпи вниз по склону вследствие размыва откоса [6], [7].

Научная новизна исследования заключается в применении комплексного подхода для оценки эффективности решений по повышению устойчивости склона, с учетом стадийностей инженерного вмешательства (имитация этапности строительства), особенностей геологического строения склона и возможности его подтопления. Существующие методы оценки эффективно проектных решений, в большинстве своем, направлены на оценку экономической составляющей.

Таким образом целью работы является разработка и оценка эффективности мероприятий по повышению устойчивости низового руслового склона водопропускных труб расположенных на косогорах участках местности. Исследование устойчивости сооружения выполнялось аналитическим методом, до ввода объекта в эксплуатацию.

Общие положения

В самом общем случае дорожная конструкция включает в себя три основных элемента:

1. Дорожная одежда состоящая, как правило, из одного или нескольких слоев покрытия, укрепленного, дренажного или специального основания. Покрытие устраивают из наиболее прочно недренирующего материала, который способен выдерживать многократное приложение динамической нагрузки от транспортного средства. Основания устраивают из менее прочных дренажных материалов, предназначенных для обеспечения несущей способности конструкции и нормального водно-теплого режима.

2. Земляное полотно устраивают из дисперсных каменных материалов и грунтов. Данный элемент конструкции предназначен для обеспечения требуемых планово-высотных характеристик дороги, а также стабильной работы дорожной одежды, т.е. без допущения ее переувлажнения.

3. Основанием дороги является естественный грунт, на который опирается земляное полотно или дорожная одежда (при отсутствии земляного полотна).

Земляное полотно и основание дороги отвечают за обеспечение устойчивости и несущей способности дороги. Грунты земляного полотна и основания дороги работают как одно целое и чем более однородными и равномерно уплотненными они являются, тем меньше будет вероятность потери устойчивости и расползания сооружения под действием транспортной нагрузки.

Водопропускную трубу устраивают в теле земляного полотна, как правило, перпендикулярно оси автомобильной дороги. Для лучшего пропуска водотока ось трубы должна совпадать с направлением водотока. Однако большой угол атаки (угол между осью трубы и осью стока) тем выше будет вероятность размыва верхнего откоса насыпи. Кроме этого, увеличение угла трубы приводит к ее удлинению и, следовательно, к удорожанию строительных работ. Критическими являются углы более 25–30°. При этом в продольном направлении уклон тела трубы должен быть в пределах от 3 до 30 % для недопущения критических уклонов, которые могут привести либо к заиливанию трубы (малые уклоны) либо к размыву (большие уклоны) [5], [7].

Объектом исследования стала водопропускная труба расположенная на км 323+635 автомобильной дороги А-376 Хабаровск — Лидога — Ванино — Комсомольск-на-Амуре. Труба расположена на косогоре и вблизи зоны подтопления р. Гобилли. Осредненный уклон склона на рассматриваемом участке составляет 1:3 (примерно 20°), что говорит о том, что склон является крутым. Максимальная высота насыпи над трубой составляет 4,50 м. Из-за сложности склона как в геометрическом плане, так и по инженерно-геологическому строению возникает необходимость оценить устойчивость склона в естественном состоянии и после инженерного вмешательства, т.е. в процессе строительства и после устройства водопропускной трубы.

Методы исследования

Устойчивость откосов насыпей земляного полотна и других сооружений оценивается локально либо методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения (метод предельного равновесия) либо методом конечных элементов (по предельным перемещениям) [8]. При этом оценка выполняется по двум критериям:

1. Определяется несущая способность конструкции исходя из условия:

$$F \leq \frac{\gamma_c F_u}{\gamma_n},$$

где F — расчетная нагрузка на основание, кН; F_u — сила предельного сопротивления основания, кН; γ_c — коэффициент условий работы, принимаемый в зависимости от типа грунта (таблица 1); γ_n — коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным 1,2; 1,15 и 1,10 соответственно для сооружений геотехнических категорий 3, 2 и 1.

2. Определяется коэффициент устойчивости сооружения:

$$K_{st} = \frac{M_{уд}}{M_{сд}} = \frac{R}{R_d}$$

где $M_{уд}$ — момент предельных удерживающих сил относительно центра вращения (центра поверхности скольжения); $M_{сд}$ — момент всех сдвигающих активных сил относительно того же центра; R — обобщенное реактивное предельное сопротивление грунта действию разрушающей нагрузки; R_d — реакция массива грунта на действующую нагрузку.

Таблица 1 - Коэффициент условий работы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.1>

Коэффициент	Дисперсные грунты			Скальные грунты		
	Пески, кроме пылеватых	Пески пылеватые, стабилизированные глинистые грунты	Глинистые грунты нестабилизированные	Невыветрелые и слабыветрелые	Выветрелые	Сильновыветрелые
γ_c	1,0	0,9	0,85	1,0	0,9	0,8

Допускаемые значения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от вида грунтов:

- песчаные грунты с постоянной влажностью — 1,2;
- глинистые грунты с постоянной и песчаные с переменной влажностью — 1,4;
- глинистые грунты с переменной влажностью — 1,5.

В соответствии с теорией Кулона — Мора предельная величина силы сопротивления грунта на поверхности скольжения зависит от удельного сцепления и угла внутреннего трения грунта, а также от формы поверхности скольжения. При применении метода конечных элементов для оценки устойчивости сооружению вычисляются предельные перемещения (деформации) конструкции под воздействием внешних сил и рассчитывается запас устойчивости конструкции.

Для сложных инженерных сооружений, наиболее точный расчет устойчивости сооружения можно выполнить методом Шахунянца, который заложен как один из вычислительных методов используемого далее программного комплекса Geo5. Метод достаточно сложен в расчетах, но при современном уровне автоматизации наибольшей сложностью является корректная задача геометрических форм и сложения склона. Формула для определения устойчивости сооружения методом Шахунянца записывается следующим образом [9]:

$$K_{st} = \frac{\sum_j^n \left(((P_{Nj} - u_j) \tan \varphi_j + c_j l_j + |P_{Qi,ud}|) \frac{\cos \varphi_j}{\cos(\alpha_j - \varphi_j)} \right)}{\sum_j^n \left(P_{Qi,sd} \frac{\cos \varphi_j}{\cos(\alpha_j - \varphi_j)} \right)},$$

где $P_{Qi,sd}$ и $P_{Qi,ud}$ — это активные силы, способствующие сползанию и удержанию склона соответственно; u_j — поровое давление в блоке; c_j — сцепление грунта в блоке; φ_j — угол внутреннего трения грунта в блоке; α_j — наклон поверхности скольжения в блоке; l_j — ширина блока.

Рассматриваемое сооружение относится к 1 категории сложности и к условиям с переменным увлажнением грунтов. Общая схема склона и искусственного сооружения представлена на рисунке 1 (размеры в метрах). Красным цветом на схеме изображены границы проектного решения по устройству водопропускной трубы.

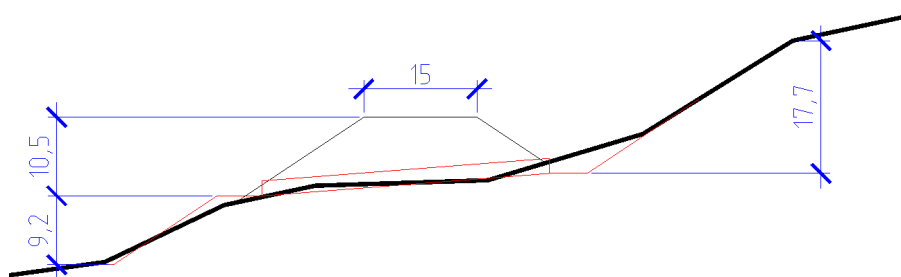


Рисунок 1 - Схема склона и искусственного сооружения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.2>

На основе схемы сооружения и геологического строения склона (рисунок 2) создана конечно-элементная модель со следующими основными параметрами:

- размер области построения: ширина 120 м, высота (перепад) склона 35 м, глубина геологического массива от 15 м (слева) до 50 м (справа);
- длина ребра элемента 1,5 м, число элементов 3182.

Результаты и обсуждения

Оценка устойчивости склона до и после мероприятий по устройству водопропускной трубы выполнена методом конечных элементов в программном комплексе Geo5. Прочностные характеристики материалов и грунтов представлены в таблице 2. Схема инженерно-геологического строения склона представлена на рисунке 2.

Таблица 2 - Характеристики материалов и грунтов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.3>

Наименование	Удельный вес, кН/м ³	Модуль упругости, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, кПа	Коэф. Пуассона
1. Насыпь (супесь легкая)	18,5	26,3	27,4	22,3	0,35
2. Песок	20,8	87	30,5	4,2	0,30
3. Суглинок легкий	19,4	13,5	14,3	15,9	0,35

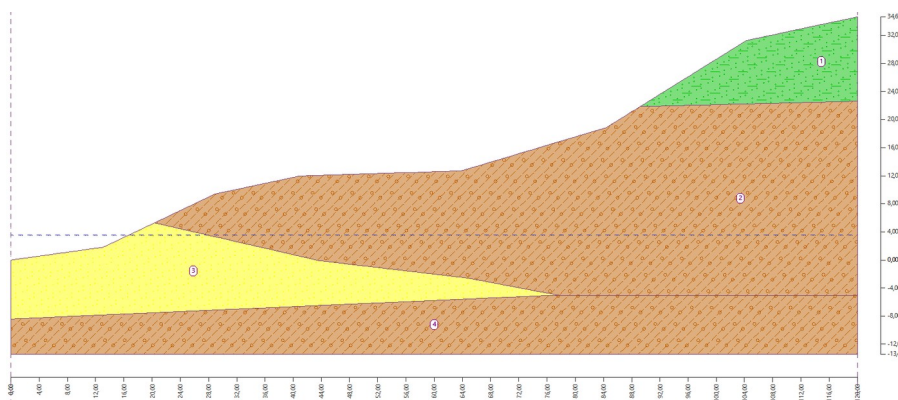


Рисунок 2 - Инженерно-геологическое строение склона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.4>

Проверка склона на начальную устойчивость показала, что склон можно считать относительно устойчивым с коэффициентом устойчивости 1,15. На рисунке 3 представлены зоны образования пластических деформаций скольжения. Рисунок 3 – Пластические деформации скольжения в естественном склоне

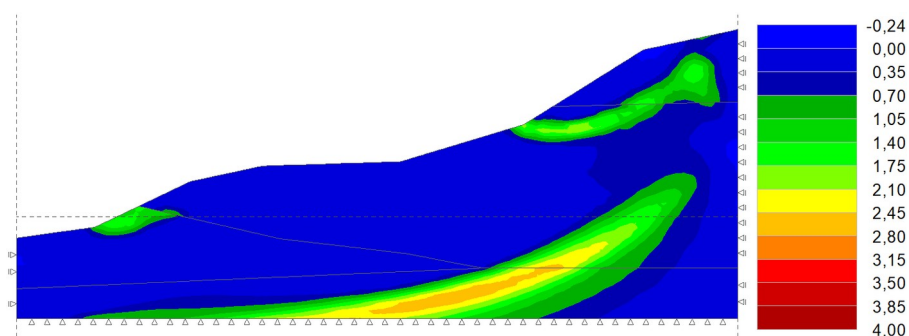


Рисунок 3 - Пластические деформации скольжения в естественном склоне

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.5>

После устройства водопропускной трубы со стандартным укреплением русла и склона каменной наброской и профилировкой откосов до требуемых уклонов общая устойчивость склона приблизилась к критическому значению $K_u = 1,01$, при требуемом не менее 1,50. На рисунке 4 представлены зоны образования пластических деформаций скольжения в склоне после нанесения проектных решений.

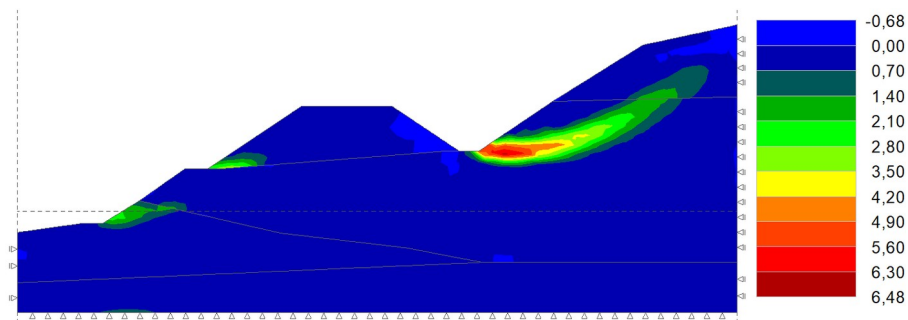


Рисунок 4 - Пластические деформации скольжения в склоне после проектных решений по устройству водопропускной трубы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.6>

Для повышения устойчивости верхового и низового склона предложена комплексная система укрепления склона, которая включает в себя следующее (рисунок 5) [10], [11]:

1. Укрепление откосов габионными конструкциями на глубину 1,0 м;
2. Устройство грунтовых анкеров инъекционного типа на глубину до 5,0 м, с длиной корня 2,0.

Грунтовые анкеры приняты в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57355-2016 Анкеры грунтовые и ВСН 506-88 Проектирование и устройство грунтовых анкеров. Проектирование и устройство грунтовых анкеров. Показатель несущей (удерживающей) способности анкера не менее 300 кН.

Инъекционные анкеры устанавливают методом бурения с подачей полимерно-цементного состава под давлением. Эффективность состава подтверждена ранее выполненными исследованиями [11]. Результаты по оценке устойчивости откосов после применения комплексного метода укрепления представлены на рисунке 6. Коэффициент запаса устойчивости укрепленного склона составляет 1,6, что больше требуемого 1,5, следовательно, требования по надежности сооружения обеспечиваются.

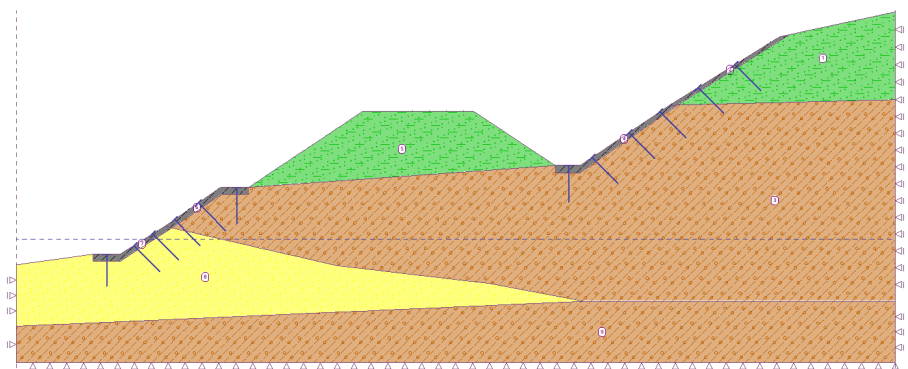


Рисунок 5 - Схема укрепления склона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.7>

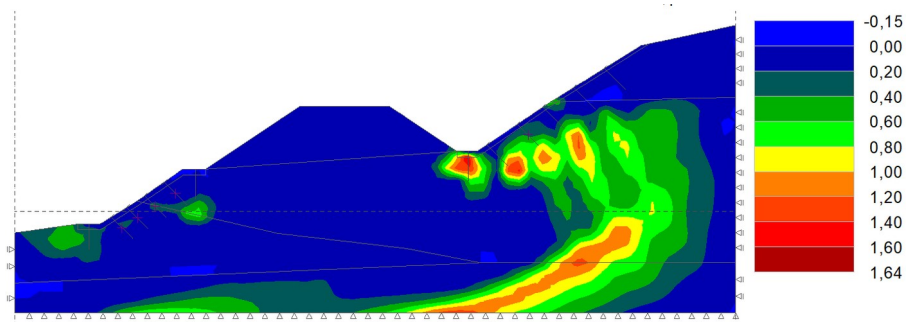


Рисунок 6 - Пластические деформации скольжения в склоне после проектных решений по устройству водопропускной трубы и укреплению склона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.8>

Рассчитано 3 схемы укрепления: две схемы с отдельным укреплением склонов габионами (схема 1), грунтовыми анкерами (схема 2) и комбинированная схема укрепления склона (схема 3). Результаты расчетов и сравнительного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Оценка устойчивости укрепленного склона

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.43.9>

Наименование	Методы поверхностей скольжения			Метод конечных элементов
	Бишопа	Феллениус–Петерсона	Шахунянца	
Укрепление габионами по типу матрацы Рено				
Верховой склон	1,40	1,38	1,38	1,10
Низовой склон	1,86 (1,52)	1,71 (1,50)	1,71 (1,50)	1,25
Укрепление грунтовыми анкерами инъекционного типа				
Верховой склон	1,38	1,40	1,32	0,90
Низовой склон	1,89 (1,55)	1,76 (1,50)	2,20 (1,62)	1,05
Комплексное укрепление				
Верховой склон	1,64	1,56	1,51	1,50
Низовой склон	1,76 (1,62)	1,73 (1,54)	1,89 (1,66)	1,57

Примечание: в скобках указаны значения для обводненного склона

Полученные результаты показывают, что для песчаных грунтов низового склона подходит как комбинированный, так и отдельные способы укрепления, но для обводненного склона лучшие значения показывает комбинированный способ укрепления. После нарушения естественной структуры верного склона, без мероприятий по укреплению, его устойчивость не обеспечивается и только комплексный способ позволяет добиться коэффициента устойчивости более 1,5.

Эффективность предлагаемых мероприятий основана не только на собственных исследованиях автора [11], но результатах других исследователей [7], [8], [10], которые применяли стандартизованных методах расчета и нормах проектирования инженерных сооружений для моделирования и оценки работоспособности конструкций с применением численных методов. Результаты расчетов подтверждают мнение о том, что для решения инженерных задач методами численного моделирования необходимо проводить верификацию результатов с натурными испытаниями или, если это невозможно, несколькими методами в одном или нескольких программах комплексах.

Заключение

В склоне, при изменении его первоначальной геометрии для устройства водопропускной трубы, развиваются пластические деформации скольжения приводящие к местной потере устойчивости ($K_y = 1,01$ свидетельствует о том, что при малейшем дальнейшем вмешательстве или приложении нагрузки устойчивость склона может быть нарушена). Для сложных геологических условий (для оползнеопасных склонов с неоднородным строением), метод Шахунянца является более надежным и информативным, чем упрощенные методы круглоцилиндрических поверхностей скольжения, так как учитывает сложную структуру склона (геометрическую и геологическую).

В работе рассмотрено 3 схемы укрепления склона: 1. укрепление габионами по типу матрацы Рено; 2. укрепление грунтовыми анкерами инъекционного типа; 3. комбинированный способ, сочетающий в себе оба метода.

Расчеты устойчивости склона показали, что только комбинированный способ укрепления, при равнозначных объемах укрепительных работ, позволяет добиться требуемого коэффициента устойчивости для верхового и низового склонов, при этом большую опасность вызывает именно верховой склон.

В целом исследование показывает, что в каждом конкретном случае, для выбора схем укрепления при инженерном вмешательстве в склон, особенно если условия эксплуатации являются сложными, необходимо разрабатывать индивидуальную схему укрепления. Для минимизации последствий и предотвращения образования и развития опасных ситуаций на строительной площадке эффективность таких решений должна быть подтверждена численными методами исследования. Кроме этого, в дальнейшем необходимо выполнять верификацию полученных моделей на основе результатов натурного обследования и мониторинга, для накопления необходимой статистической информации. Только в этом случае можно говорить о высоком уровне надёжности проектных решений, но данная задача должна решаться уже по инициативе федеральных служб отвечающих за эксплуатацию дорог и искусственных сооружений на них.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Каменчуков А.В. Концепция прогнозирования эксплуатационного состояния дорожных покрытий / А.В. Каменчуков, И.Н. Пугачев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2025. — № 4 (45). — С. 54–57. — DOI: 10.31079/2415-8658-2025-4-54-57. — EDN: ZEMKSB.
2. Слободчикова Н.А. Прогнозирование изменения во времени некоторых переменных параметров состояния автомобильных дорог / Н.А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2023. — Т. 13. — № 4 (47). — С. 677–686. — DOI: 10.21285/2227-2917-2023-4-677-686. — EDN: HXWKND.
3. Тиратурян А.Н. Моделирование управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог / А.Н. Тиратурян // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19. — № 1. — С. 115–127. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127. — EDN: KYODAR.
4. Луга А.А. Локальные оползни, возникающие на береговых склонах при отсыпке подходов насыпей к мостам / А.А. Луга, И.С. Шелкович // Свайные фундаменты : труды ВНИИ трансп. стр-ва. — Москва: Транспорт, 1981. — С. 28–35.
5. Черников А.В. Зарубежный опыт проектирования и строительства гофрированных водопропускных труб / А.В. Черников, В.А. Козлов // Строительная механика и конструкции. — 2023. — № 1 (36). — С. 84–92. — DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.009. — EDN: FESWCI.
6. Шапиро Д.М. Геотехнические аварии дорожных сооружений и их ликвидация / Д.М. Шапиро, А.П. Тютин // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т. 11. — № 3. — С. 89–101. — DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.08. — EDN: DOIFKH.
7. Хрянина О.В. Оценка эффективности устройства водопропускной трубы при строительстве автомобильной дороги федерального значения / О.В. Хрянина, Е.С. Саксонова, Д.В. Абаев [и др.] // Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 7. — № 4. — С. 63–67. — DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-4-63-67. — EDN: BHOWJM.
8. Горшков Н.И. Особенности оценки устойчивости грунтовых сооружений на основе расчетов МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сборник статей научно-технической конференции ; СПбГАСУ. — Санкт-Петербург, 2012. — С. 93–105.
9. Меркурьев Ю.С. Анализ устойчивости насыпи по методу Г.М. Шахунянца с учётом сейсмических воздействий / Ю.С. Меркурьев, Г.М. Стоянович, И.О. Шехтман // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 1 (42). — С. 41–46.
10. Бадоян Н.Ш. Оценка эффективности применения габионных конструкций в строительстве автомобильных дорог / Н.Ш. Бадоян, Л.С. Щепетева, К.Г. Пугин // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5. — № 4. — С. 5. — DOI: 10.15862/05SATS418. — EDN: YURQWL.
11. Каменчуков А.В. Применение грунтовых анкеров для укрепления слабых оснований / А.В. Каменчуков, С.А. Собчук // Международный научно-исследовательский журнал. — 2025. — № 6 (156). — DOI: 10.60797/IRJ.2025.156.43. — EDN: OULYJF.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kamenchukov A.V. Konceptija prognozirovaniya jekspluatacionnogo sostojanija dorozhnyh pokrytij [Concept of forecasting the operational state of road pavements] / A.V. Kamenchukov, I.N. Pugachev // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona [Transport of the Asia-Pacific Region]. — 2025. — № 4 (45). — P. 54–57. — DOI: 10.31079/2415-8658-2025-4-54-57. — EDN: ZEMKSB. [in Russian]
2. Slobodchikova N.A. Prognozirovanie izmenenija vo vremeni nekotoryh peremennyh parametrov sostojanija avtomobil'nyh dorog [Forecasting time-dependent changes in some variable parameters of the state of highways] / N.A. Slobodchikova // Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate]. — 2023. — Vol. 13. — № 4 (47). — P. 677–686. — DOI: 10.21285/2227-2917-2023-4-677-686. — EDN: HXWKND. [in Russian]
3. Tiraturjan A.N. Modelirovanie upravljajushhih vozdeystvij na jekspluatacionnoj stadii zhiznennogo cikla avtomobil'nyh dorog [Modeling of control actions at the operational stage of the life cycle of highways] / A.N. Tiraturjan // Vestnik MGSU [Bulletin of MSCU]. — 2024. — Vol. 19. — № 1. — P. 115–127. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127. — EDN: KYODAR. [in Russian]
4. Luga A.A. Lokal'nye opolzni, vznikajushhie na beregovykh sklonah pri otsypke podhodnyh nasypej k mostam [Local landslides occurring on coastal slopes during the filling of approach embankments to bridges] / A.A. Luga, I.S. Shelkovich // Svajnye fundamenty : trudy VNII transp. str-va [Pile foundations : proceedings of the Research Institute of Transport Construction]. — Moscow: Transport, 1981. — P. 28–35. [in Russian]
5. Chernikov A.V. Zarubezhnyj opyt proektirovaniya i stroitel'stva gofirovannyh vodopropusknyh trub [Foreign experience in the design and construction of corrugated culverts] / A.V. Chernikov, V.A. Kozlov // Stroitel'naja mehanika i

- konstrukcii [Structural Mechanics and Structures]. — 2023. — № 1 (36). — P. 84–92. — DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.009. — EDN: FESWCI. [in Russian]
6. Shapiro D.M. Geotekhnicheskie avarii dorozhnyh sooruzhenij i ih likvidacija [Geotechnical accidents of road structures and their elimination] / D.M. Shapiro, A.P. Tjutin // Construction and Geotechnics. — 2020. — Vol. 11. — № 3. — P. 89–101. — DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.08. — EDN: DOIFKH. [in Russian]
7. Hranina O.V. Ocenka jeffektivnosti ustrojstva vodopropusnoj truby pri stroitel'stve avtomobil'noj dorogi federal'nogo znacheniya [Evaluation of the effectiveness of culvert installation during the construction of a federal highway] / O.V. Hranina, E.S. Saksonova, D.V. Abaev [et al.] // Stroitel'stvo i arhitektura [Construction and Architecture]. — 2019. — Vol. 7. — № 4. — P. 63–67. — DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-4-63-67. — EDN: BHOWJM. [in Russian]
8. Gorshkov N.I. Osobennosti ocenki ustojchivosti gruntovyh sooruzhenij na osnove raschetov MKJe [Features of assessing the stability of soil structures based on finite element analysis] / N.I. Gorshkov, M.A. Krasnov // Chislennyye metody raschetov v prakticheskoy geotekhnike : sbornik statej nauchno-tehnicheskoy konferencii ; SPbGASU [Numerical methods of analysis in practical geotechnics : collection of articles of the Scientific and Technical Conference ; SPbGASU]. — Saint Petersburg, 2012. — P. 93–105. [in Russian]
9. Merkur'ev Ju.S. Analiz ustojchivosti nasypi po metodu G.M. Shahunjanca s uchjotom sejsmicheskikh vozdeystvij [Analysis of embankment stability by the method of G.M. Shakhunyan taking into account seismic impacts] / Ju.S. Merkur'ev, G.M. Stojanovich, I.O. Shehtman // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija [Proceedings of Petersburg State Transport University]. — 2015. — № 1 (42). — P. 41–46. [in Russian]
10. Badojan N.Sh. Ocenka jeffektivnosti primeneniya gabionnyh konstrukcij v stroitel'stve avtomobil'nyh dorog [Evaluation of the effectiveness of gabion structures in highway construction] / N.Sh. Badojan, L.S. Shhepetova, K.G. Pugin // Transportnye sooruzhenija [Transport Structures]. — 2018. — Vol. 5. — № 4. — P. 5. — DOI: 10.15862/05SATS418. — EDN: YURQWL. [in Russian]
11. Kamenchukov A.V. Primenenie gruntovyh ankerov dlja ukrepleniya slabych osnovanij [Application of ground anchors for strengthening weak foundations] / A.V. Kamenchukov, S.A. Sobchuk // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2025. — № 6 (156). — DOI: 10.60797/IRJ.2025.156.43. — EDN: OULYJF. [in Russian]