

УДК: 624.15
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.4
EDN: EDRLTP



Численное моделирование устойчивости природного склона в условиях техногенных рисков

Л.Р. Епифанцева¹, М.Д. Кайгородов¹, Н.Ю. Киселев¹, Ю.В. Наумкина¹,
Я.А. Пронозин¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Основной проблемой обеспечения безопасности зданий вблизи оползнеопасных склонов является дефицит времени и геотехнических данных для оценки рисков вторичных склоновых процессов. Цель работы — оценка устойчивости склона и прогнозирование рисков его вторичного обрушения или воздействия на два близлежащих здания, а также разработка превентивных мер на примере аварийного участка в г. Тобольске.

Задачами исследования являются: разработать этапы инженерно-организационных мероприятий, позволяющих выстроить алгоритм действий, направленных на минимизацию рисков дальнейшего ухудшения геотехнической ситуации с учетом геотехнической неопределенности. Провести системный анализ факторов, обуславливающих геотехническую неопределенность на рассматриваемом объекте.

Результаты. Представлены результаты оценки устойчивости склона методом численного моделирования в ПК MIDAS на основе метода снижения прочности. Расчеты выполнены на основе архивных данных, изысканий на соседних склонах, образцов грунта из зоны обрушения и данных экспресс-обследования. Расчеты учитывали потенциальное ухудшение свойств грунтов при техногенном замачивании. Показано, что в условиях неопределенности коэффициент устойчивости может быть, как больше, так и меньше 1,0, что свидетельствует о высоких рисках для зданий. Предложены два этапа противоаварийных мероприятий: усиление фундаментов буроинъекционными сваями и последующее укрепление склона подпорной стеной с анкерами и пригрузом. После получения отчета о фактических геологических данных выполнены дополнительные расчеты, подтвердившие эффективность решений.

Выводы. Анализ результатов позволил выявить обоснованные меры, повышающие коэффициент устойчивости и снижающие глубинные сдвиги. Разработана оптимальная схема усиления, обеспечивающая требуемую надежность. Значимость результатов заключается в возможности применения предложенных подходов для минимизации рисков аварийных ситуаций при оползнях вблизи существующей застройки.

Ключевые слова: буроинъекционные сваи, устойчивость склонов, оползни, численное моделирование, усиление фундаментов, техническое обследование, сдвиговые деформациями.

Для цитирования: Епифанцева Л.Р., Кайгородов М.Д., Киселев Н.Ю., Наумкина Ю.В., Пронозин Я.А. Численное моделирование устойчивости природного склона в условиях техногенных рисков // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 40-51, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.4, EDN: EDRLTP

Numerical modeling of natural slope stability under conditions of anthropogenic risks

L.R. Epifantseva¹, M.D., Kaigorodov¹, N.Yu. Kiselev¹, Yu.V. Naumkina¹,
Ya.A. Pronozin¹

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The main problem for ensuring the safety of buildings near landslide-prone slopes is the lack of time and geotechnical data to assess the risks of secondary slope processes. The aim of the work is to assess the slope stability and predict the risks of its secondary collapse or impact on two nearby buildings, as well as to develop preventive measures using the example of an emergency site in Tobolsk.

The research objectives are: 1) to develop the stages of engineering and organizational measures that allow creating an algorithm of actions aimed at minimizing the risks of further deterioration of the geotechnical situation, taking into account geotechnical uncertainty; 2) to conduct a systemic analysis of the factors that determine geotechnical uncertainty at the site under consideration.

Results. The results of the slope stability assessment by numerical modeling in the MIDAS software complex based on the strength reduction method are presented. The calculations were performed based on archival data, surveys from adjacent slopes, soil samples from the collapse zone, and express survey data. The calculations took into account the potential deterioration of soil properties under technogenic soaking. It is shown that under conditions of uncertainty, the stability factor can be either greater or less than 1.0, which indicates high risks for the buildings. Two stages of emergency response measures are proposed: strengthening the foundations with bored injection piles and subsequent reinforcement of the slope with a retaining wall with anchors and surcharge. After receiving the report on the actual geological data, additional calculations were performed, which confirmed the effectiveness of the solutions.

Conclusions. The analysis of the results made it possible to identify justified measures that increase the stability factor and reduce deep-seated movements. An optimal reinforcement scheme ensuring the required reliability has been developed. The significance of the results lies in the possibility of applying the proposed approaches to minimize the risks of emergency situations during landslides near existing buildings.

Keywords: bored-injection piles, slope stability, landslides, numerical modeling, foundation reinforcement, technical survey, shear deformations.

For citation: Epifantseva L.R., Kaigorodov M.D., Kiselev N.Yu., Naumkina Yu.V., Pronozin Ya.A. Numerical modeling of natural slope stability under conditions of anthropogenic risks // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 40-51, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.4, EDN: EDRLTP

1. Введение

Здания и сооружения, возведённые вблизи склонов, представляют с грунтовым основанием сложную геотехническую систему, с высокой степенью непредсказуемости возникновения оползневых процессов. Эти процессы зависят от различных природных факторов, таких как крутизна склона, состав и структура грунтов, уровень грунтовых вод, климатические условия и различные виды антропогенных воздействий, включая техногенное обводнение [1-3]. Для предотвращения появления негативных склоновых процессов, необходимо проводить детальные исследования и применять меры по укреплению склонов [4,5]. Благодаря развитию вычислительной техники и компьютерных программ, стал доступен мощный инструмент прогнозирования — численное моделирование развития оползней [6-8].

Однако, в условиях происходящих склоновых процессов и возможного вторичного их проявления, и влияния на близлежащую застройку часто имеет место дефицит времени на принятие оперативных решений при отсутствии достаточных геотехнических данных. В таких ситуациях приоритет отдаётся временным мерам стабилизации, таким

как установка временных опор, отключение водоносных систем, организация дренажных систем и укрепление наиболее уязвимых участков [11,12].

В научной литературе отражены различные способы предотвращения оползневых процессов в сложных инженерно-геологических условиях с помощью: анкерных конструкций [13], буровыми сваями с контролируемым уширением, кремнефтористой силикатизации [14] и различными современными инновационными методами упрочнения слабых грунтов оснований.

Параллельно стараются проводить экстренные обследования для оценки текущего состояния склонов и прогнозирования возможных сценариев развития событий [15]. Важно также учитывать долгосрочные последствия принимаемых мер и планировать дальнейшие шаги по обеспечению устойчивости сооружений на склонах [16].

В работе [17] проведены исследования применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для мониторинга рельефа. БЛА многократно доказало свою эффективность для малых территорий в отношении разных видов ландшафта, испытывающих воздействие опасных геоморфологических процессов, среди которых выделяется оползнеобразование.

Целью работы являлась оценка устойчивости склона и прогнозирование рисков его вторичного обрушения на примере оползня в г. Тобольске, произошедшего в непосредственной близости от двух капитальных строений: ОКН Спортивный клуб «Иртыш» (далее Объект №1), ОКН «Главный арестантский корпус» (далее Объект №2) в условиях геотехнической неопределенности.

Объектом исследования является склон, с произошедшим оползнем и подземная часть Объекта №1 и Объекта №2, расположенные вблизи склона (рис.1).

Предметом исследования является оценка устойчивости склона вблизи строений, как в текущих условиях, так и после проведения противоаварийных мероприятий.

К задачам исследования относятся:

1. Выполнить техническое обследование близлежащих зданий (Объекта №1 и Объекта №2), попадающих в зону возможного вторичного обрушения;

2. Дать оценку устойчивости склона используя метод численного моделирования, на основе доступных и оперативно полученных данных, для прогноза дальнейшего развития ситуации при различных сценариях;

3. Предложить противоаварийные мероприятия и их этапность, повышающие устойчивость склона и обеспечивающих стабильное состояние объектов в процессе производства работ и дальнейшей эксплуатации.

4. На основе фактических ИГУ, используя метод численного моделирования дать оценку надежности выполненных противоаварийных мероприятий, обеспечивающий необходимый уровень надежности и долговечности

На момент принятия принципиальных решений по обеспечению устойчивости склона и недопущения аварии на близкорасположенных объектах, отсутствовали какие-либо технические и инженерно-геологические данные. Поэтому весьма важно было спланировать и своевременно выполнить решения максимально снижающие риски повторения аварийной ситуации. Таким образом, оперативно в качестве неотложных мероприятий, в течение одной недели, были выполнены следующие виды работ: Аэрофотосъемка места оползня и прилегающей территории; Первичное обследование двух зданий, численное моделирование склона в условиях геотехнической неопределенности, разработка проекта усиления фундаментов зданий и склона. По результатам проектирования выполнение буроинъекционных свай на двух объектах культурного наследия.

2. Материалы и методы

Аэрофотосъемка проведена квадрокоптером (рис. 1) DJI Mavic 3 с бортовым модулем RTK (Real Time Kinematic), обеспечивающим точное позиционирование изображений. Аппарат адаптирован для совместной работы с программой DJI Terra, предназначенной для обработки аэрофотоматериалов и формирования цифровых карт местности, а также трёхмерных моделей ландшафта и объектов методами фотограмметрической съёмки.

Предварительно определённые размеры оползневого участка составляют в верхней

части — 16 м, в нижней части — 64 м, протяжённость достигает 126 м. Общая площадь оползневого участка равна 4745 м², объём обрушившегося грунта составляет порядка 900 м³ (больше). Обвал повлек разрушение участков территории и элементов инфраструктуры Объекта №2. Расстояние от границы обвала до ближайших сооружений составило примерно 5 м, глубина провалов вдоль края откоса достигла 6 м.

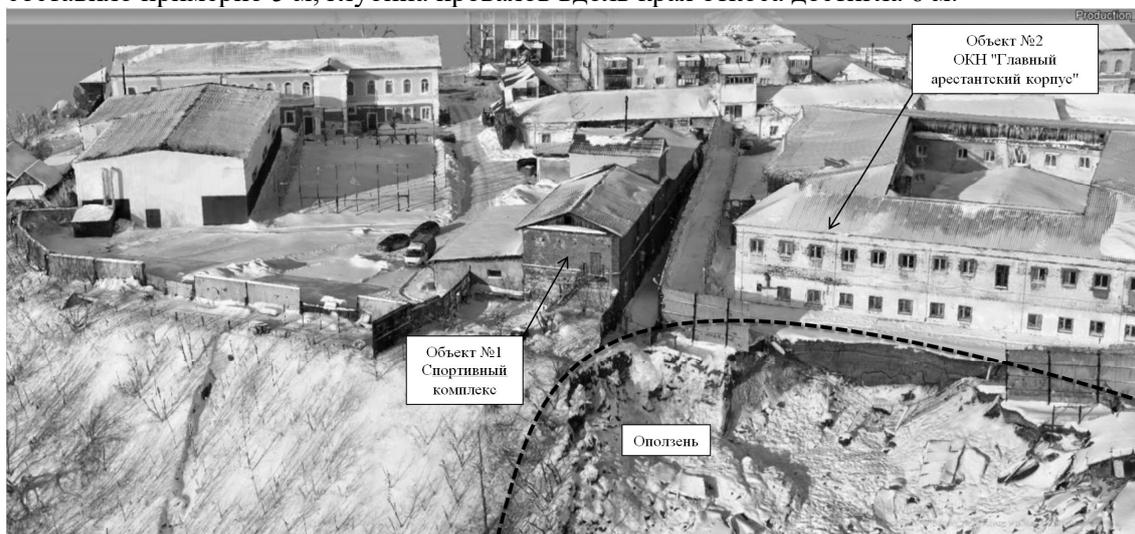


Рис. 1. Ситуационная схема аварийного участка (иллюстрация автора)

Fig. 1. Situation diagram of the emergency section (illustration by authors)

Первичное обследование. Конструктивная схема Объекта №1 и Объекта №2 – бескаркасная стеновая с продольными несущими и поперечными стенами. Общая устойчивость зданий обеспечивается за счет взаимно расположения стен. Внутренние и наружные стены здания выполнены из кирпича. Фундаменты – ленточные кирпичные. После проведения обследования обоих зданий выявлены дефекты, относящиеся только к эксплуатационным факторам, их общее техническое состояние оценивается как ограниченно-работоспособное. Оползневая ситуация в момент обрушения не повлияла на состояние объектов, однако оставался высокий риск накопления сдвиговых деформаций в основании, с последующей их реализацией в виде повторного оползня. На срезе оползня были зафиксированы прямые утечки сетей и переувлажнение грунтового массива, сложенного глинистыми грунтами. По всей видимости утечки имели продолжительный и системный характер.

Для оперативного анализа обстановки и принятия экстренных мероприятий были использованы архивные геологические сведения по соседним участкам и материалы экспресс обследования грунтов с обрушенной части склона (табл. 1). ИГЭ-1- Насыпной грунт представлен неоднородными грунтами: суглинки, песок с включениями строительного мусора, реже лома кирпича, мощностью 1,8 м. ИГЭ-2 - Суглинок желтовато-серый, серый полутвердой консистенции, мощностью 3,4 м. ИГЭ-3 - Суглинок серый тугопластичной консистенции, мощностью 4,8 м. В численном моделировании использовались различные варианты сложения грунтов, с потенциально возможным снижением значений прочностных характеристик.

Нормативные и расчётные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов по результатам статистической обработки лабораторных данных инженерно-геологических элементов склонов похожего генезиса представлены в табл. 1.

Численное моделирование участков склонов выполнено в плоской постановке с использованием специализированного геотехнического программного комплекса MIDAS GTS NX, прошедшего процедуру сертификации и верификации РААСН.

Согласно СП 248.1325800 критерий обеспечения необходимой степени надежности и устойчивости склонов и откосов выражается частным коэффициентом модели — коэффициентом устойчивости k_{st} , определяемым как отношение сдвиговой прочности грунта к касательным напряжениям, возникающим на рассматриваемой поверхности скольжения.

Расчетный коэффициент устойчивости откоса необходимо определять путем

нахождения минимального значения среди всех возможных вариантов поверхностей скольжения. Значение коэффициента устойчивости откоса $[k_{st}]$ должно превышать либо равняться нормированной величине $[k_{st}]$, установленной согласно СП 116.13330: $[k_{st}] = 1,15$.

Таблица 1

Архивные геологические сведения по соседним участкам, материалы экспресс обследования грунтов с обрушенной части склона

№ п/п	Номенклатурное название грунта	Плотность, г/см ³			Удельное сцепление, кПа			Угол внутреннего трения, гр.			Модуль деформ., МПа E
		γ_n	γ_{II}	γ_I	C_n	C_{II}	C_I	φ_n	φ_{II}	φ_I	
1	Насыпной грунт	1,92	1,92	1,89	-	-	-	-	-	-	$R_0=150$ кПа
2	Суглинок полутвердый	1,94	1,93	1,92	15	15	10	26	26	23	13
3	Суглинок тугопластичный	1,93	1,92	1,90	13	13	9	25	25	21	12

Нахождение коэффициента устойчивости склона производилось численным методом упругопластическими расчетами методом конечных элементов (МКЭ) с использованием метода снижения прочностных характеристик Strength Reduction Method (SRM). Идея метода состоит в том, что устойчивость склона обеспечивается прочностными параметрами грунта, а их снижение способно привести к потере устойчивости. На этой идее основана процедура пошагового снижения прочностных параметров грунта SRM в МКЭ. Количественное значение коэффициента устойчивости является отношение исходных прочностных характеристик к характеристикам в предельном состоянии, соответствующем пластическому течению грунта:

$$K_{st} = \frac{c_{исх}}{c_{кр}} = \frac{\varphi_{исх}}{\varphi_{кр}}$$

где, $c_{исх}$, $\varphi_{исх}$ – исходные прочностные характеристики;
 $c_{кр}$, $\varphi_{кр}$ – критические прочностные характеристики, соответствующие пластическому течению грунта в рассматриваемой области.

3. Результаты и обсуждение

В результате проведенного моделирования был выполнен анализ зоны возможного скольжения и проведена оценка надежности склонов. Предварительные расчеты устойчивости в ПК MIDAS существующего склона демонстрируют формирование вторичной поверхности скольжения с захватом грунтового основания Объекта №2 - ОКН «Главный арестантский корпус» (рис. 2). Существует вероятность частичного разрушения Объекта №2, а также высокая вероятность риска негативного влияния текущего состояния склона на эксплуатационную надежность Объекта №1.

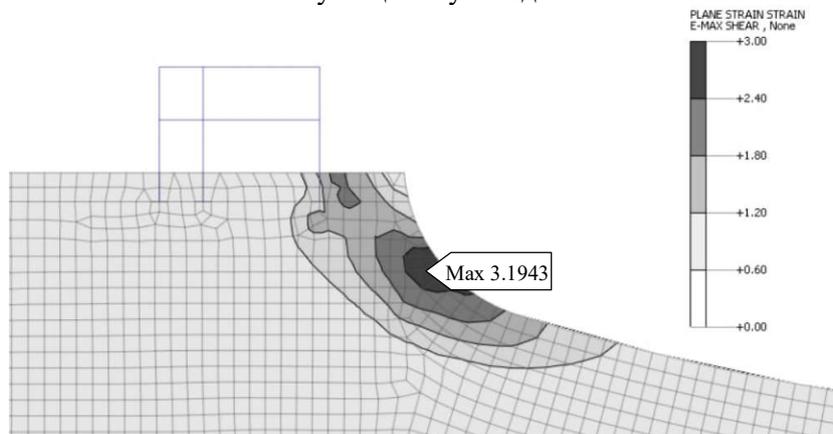


Рис. 2. Результаты предварительного расчета устойчивости: массива вторичного обрушения склона (иллюстрация автора)

Fig 2. Results of preliminary stability calculation: secondary slope collapse mass (illustration by the authors)

Показано, что значение коэффициента устойчивости склона способно варьироваться как выше, так и ниже 1,0 в условиях геотехнической неопределённости, что с большой долей вероятности сигнализирует о нестабильном положении склона и повышенных рисках вовлечения сооружений в зону повторного обрушения.

С учетом представленных фактов, а также визуального обследования, был сделан вывод о необходимости безотлагательного выполнения противоаварийных работ.

Выполнение противоаварийных работ было разделено на 2 противоаварийных этапа и общее восстановление участка склона:

I Этап противоаварийных мероприятий (рис. 3):

1. Усиления склона безударным методом устройства буроинъекционных свай (БИС), длиной 16 м;
2. Проведение проектно-изыскательских работ по обследованию склона;

II Этап противоаварийных мероприятий (рис. 4):

3. Создание технологического спуска и устройства временной дороги для последующего устройства удерживающей подпорной стенки;
4. Устройство подпорной стенки с упорными сваями и грунтовыми анкерами для стабилизации верхней части склона и обеспечения безопасности окружающей застройки;
5. За подпорной стенкой выполняется отсыпка грунта с послойным уплотнением;

III Общее восстановление участка склона:

6. Общее восстановление обрушенного участка склона:
 - устройством дополнительных укрепительных конструкций в нижней части склона у р. Курдюмка;
 - созданием дренажной системы;
 - восстановлением почвенно-растительного слоя.

Усиление фундаментов зданий было принято буроинъекционными сваями, т.к. устройство свай выполняется малогабаритной установкой бурения, что делает возможным производить работы в стесненных условиях, в том числе внутри помещений здания. Минимальная требуемая высота помещения составляет 1,7 метра.

При назначении длины сваи обязательно учитывалось следующее правило: нижний конец свай располагается не менее 5 метров ниже возможной поверхности скольжения (поверхности обрушения склона).

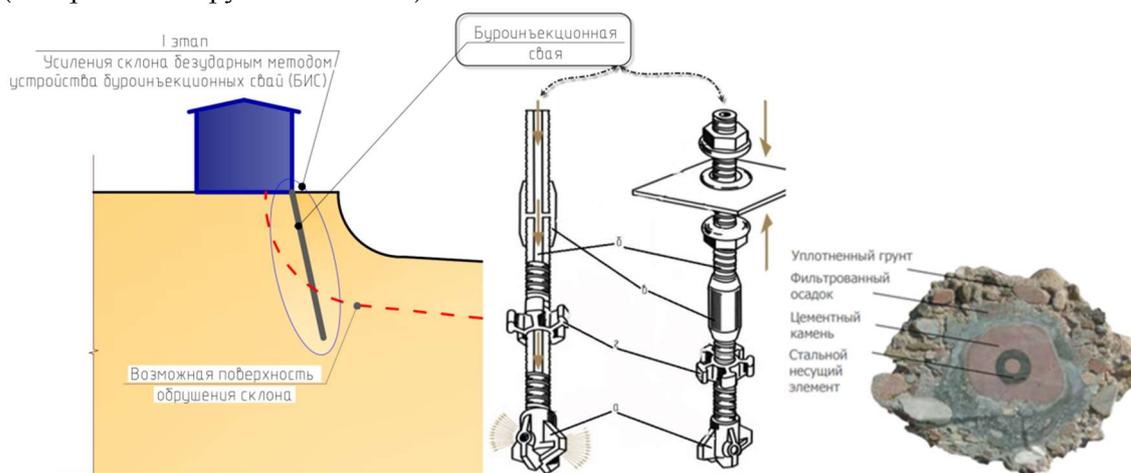


Рис.3. Общая схема I этапа противоаварийных работ. Общий вид и конструктивные элементы БИС: а – буровое долото (коронка); б – штанга; в – соединительная муфта; г – центратор (иллюстрация автора)

Fig.3. General scheme of stage I of emergency response works. General view and structural elements of bored-injection piles: а - drill bit (crown); б - rod; в - coupling sleeve; г - centralizer (illustration by the authors)

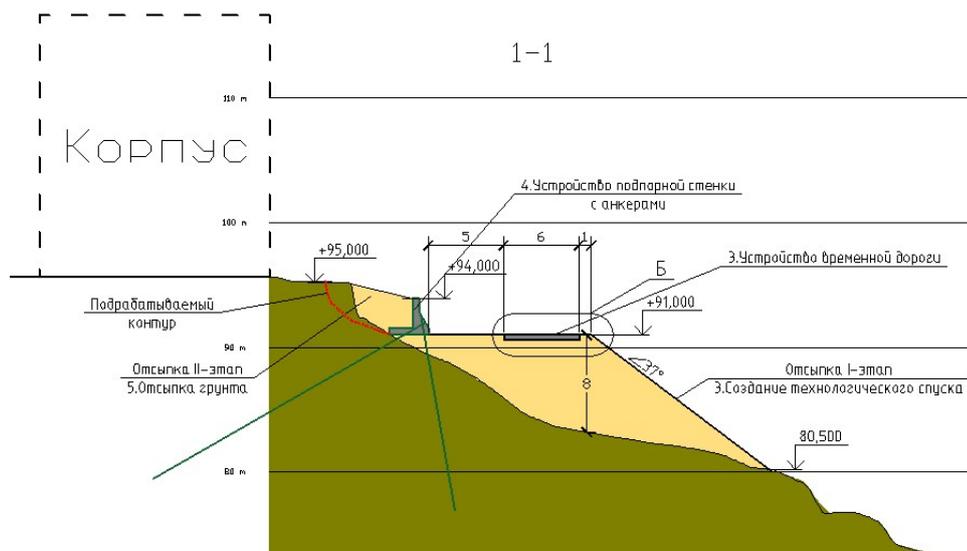


Рис.4. Общая схема II этапа противоаварийных работ (иллюстрация автора)
 Fig.4. General scheme of stage II of emergency response works (illustration by the authors)

Работы I этапа противоаварийных работ проводились в строгой последовательности. Сначала выполнялось сверление отверстий в фундаменте диаметром 200 мм. Длина свай принята из условия расположения не менее 5 метров ниже возможной поверхности скольжения (поверхности обрушения склона). Далее проводили бурение скважин, одновременно подавая буровой раствор. Глубинное продвижение осуществляли постепенным наращиванием штанг с использованием резьбовых соединений. По достижении расчетной глубины нагнетали густой пескоцементный раствор, замещающий шлам. Оставшуюся в грунте штангу использовали как арматуру, верхняя часть штанги срезалась по месту. Последним этапом стало восстановление внешнего слоя кирпичной стены. Несущая способность сваи составила приблизительно 50 т.

В ходе реализации I этапа противоаварийных мероприятий осуществлялся непрерывный геотехнический мониторинг состояния близлежащих строений и регулярная оценка обстановки посредством анализа аэрофотоматериалов. Итоги мониторинга зафиксировали отсутствие выявленных отклонений от проектных показателей. Вторичное разрушение откоса зафиксировано не было.

После проведения первоочередных мероприятий по обеспечению стабильного состояния крайней к склону продольной стены здания были получены фактические данные по ИГУ площадки (табл. 2). Слой Н - Техногенный (насыпной) грунт: суглинок легкий пылеватый тугопластичный, с прослоями полутвердого, с включением строительного мусора и битого кирпича до 40%, мощностью 4,9 м. ИГЭ-1- Суглинок легкий пылеватый тугопластичный, с прослоями полутвердого, мощностью 7,1 м. ИГЭ-2 - Суглинок легкий пылеватый мягкопластичный, мощностью 4,8 м. ИГЭ-3 - Песок пылеватый влажный плотный, мощностью 0,9 м. На основе этих данных было выполнено численное моделирование поведения склона с учетом выполненных противоаварийных мероприятий I этапа (рис. 3), а также предварительно разработанных мероприятий II этапа (рис.4).

Результаты численного моделирования показывают, что минимальный коэффициент устойчивости, полученный по предварительным данным (рис.2) и по фактическим ИГУ (рис.5а) практически не изменился и составил $k_{ст}=1,3$. Однако появились глубинные сдвиги, означающие, что в его внутренней структуре наблюдаются локальные деформации и перемещения. Эти сдвиги свидетельствуют о наличии потенциальных зон напряжений и возможных очагов разрушения внутри массива грунта, которые могут привести к развитию трещин или локальных скольжений при дальнейшем ухудшении условий.

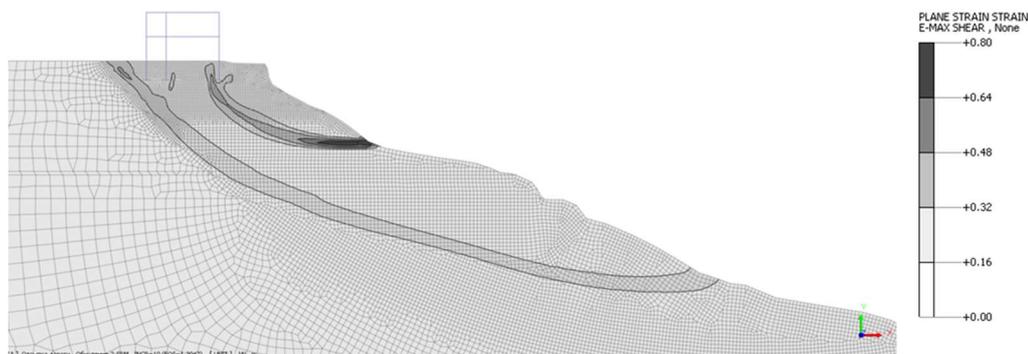
Таблица 2

Фактические значения характеристик грунтов

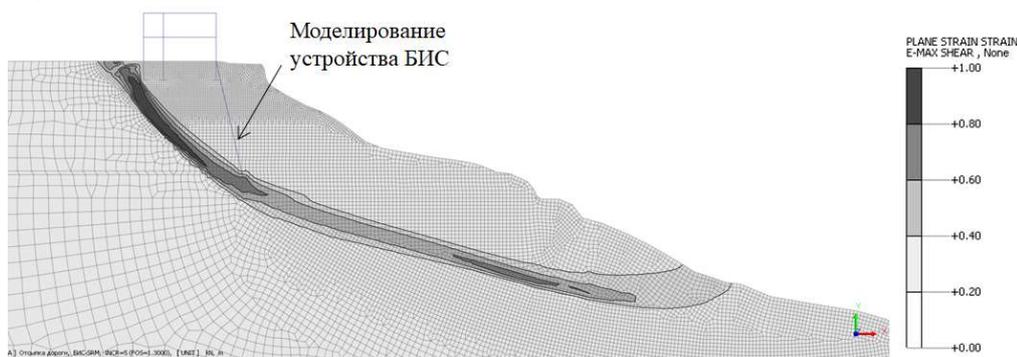
Номер ИГЭ, слоя	Плотность грунта, г/см ³			Удельное сцепление, кПа			Угол внутреннего трения, град.			Модуль деформации, МПа
	γ_n	γ_{II}	γ_I	C_n	C_{II}	C_I	φ_n	φ_{II}	φ_I	E
н	1,86	1,86	1,86	23	21	20	21	19	18	13,9
1	1,87	1,85	1,83	21	18	15	20	20	19	11,6
2	1,81	1,77	1,74	16	13	11	16	15	14	8,0
3	1,92	1,92	1,92	6	6	4	34	32	31	36,8

После устройства БИС усиления (рис. 5б) потенциальные поверхности скольжения исчезли под зданием и сконцентрировались за зданием по потенциальной поверхности глубинного сдвига. Несмотря на достаточную величину коэффициента, склон во избежание дальнейшей эрозии поверхности должен был быть восстановлен, с устройством необходимой дороги для транспорта.

а) Начальный этап FOS=1.3047



б) Устройство БИС FOS=1.3000



в) Насыпь ярус 9. FOS=1.0504





Рис.5. Численное моделирование поведения склона с учетом предварительно разработанных мероприятий: а) начальное НДС склона; б) НДС склона с выполненными БИС; в) НДС склона с отсыпкой под технологическую дорогу; г) НДС склона с устройством подпорной стенки и анкеров, а также пригрузом уположения-7 от подножия склона (иллюстрация автора)

Fig. 5. Numerical modeling of the slope behavior taking into account pre-developed measures: a) initial stress-strain state of the slope; b) stress-strain state of the slope with drill-injection piles; c) stress-strain state of the slope with backfilling under the technological road; d) stress-strain state of the slope with a retaining wall and anchors, as well as loading of reinforcement-7 from the foot of the slope (illustration by the author)

В результате моделирования отсыпки под технологическую дорогу (рис 5в) было установлено, что коэффициент устойчивости снижается $k_{st}=1,05$, однако, за счет пригруза отсыпкой исчезает потенциальная поверхность по глубинному сдвигу и сдвиги концентрируются в естественном основании под краем насыпи.

Сравнительный анализ эффективности мероприятий показал следующее. Устройство подпорной стенки с анкерами само по себе не привело к существенному росту коэффициента устойчивости (k_{st} остался на уровне ≈ 1.05), а зона максимальных сдвиговых деформаций сохранилась под краем насыпи. Для достижения нормативного значения коэффициента (1,15-1,2) потребовалось дополнительное мероприятие – пригруз откоса в его нижней части. В результате моделирования была предложена и оптимизирована рациональная схема пригруза (уположение-7), которая позволила повысить коэффициент устойчивости до требуемого значения $k_{st} = 1,15$. Сравнение итоговых расчётов (рис. 5в и 5г) подтверждает, что именно комплекс мер, включающий пригруз, обеспечивает необходимый уровень безопасности для сооружений на бровке склона. В силу технологических особенностей работ, при реальном проектировании уположение целесообразно выполнять в виде технологических берм, совмещая их с устройством дренажных систем и противоэрозионной защиты.

4. Заключение

1. Выполненное численное моделирование на основе архивных данных выявило высокий риск развития аварийной ситуации. Применение метода снижения прочностных характеристик показало возможность формирования вторичной поверхности скольжения с непосредственным воздействием на фундамент Объекта №2. Установлено, что в условиях исходной геотехнической неопределенности расчётный коэффициент устойчивости склона (k_{st}) может варьироваться как выше, так и ниже 1,0. Это подтверждает критическую зависимость оценки от точности входных данных и демонстрирует необходимость экстренного вмешательства для исключения катастрофического сценария.

2. Предложен и успешно реализован алгоритм оперативного реагирования, ключевым элементом которого является срочное усиление фундаментов буроинъекционными сваями (БИС). Данная мера, выполненная в сжатые сроки (в течение одной недели), обеспечила стабильность объектов культурного наследия, находящихся в зоне риска, на период проведения всех последующих работ. Выбор технологии БИС был обусловлен не только скоростью, но и возможностью её применения в стеснённых

условиях с минимальным воздействием на исторические конструкции, что подчёркивает её ценность для экстренных работ в сложной городской среде.

3. На основании фактических ИГУ выполнено численное моделирование всех последующих этапов усиления склона для определения рациональной схемы мероприятий, обеспечивающая необходимый уровень надежности и долговечности, а также минимизацию возможных рисков развития аварийных ситуаций в будущем. Предложенная многоэтапная схема укрепления, сочетающая БИС, подпорную стену с анкерами и пригруз, показала положительный эффект. Комбинирование методов, позволило достичь требуемого коэффициента запаса ($k_{st} \approx 1.15$), однако наша схема была оптимизирована для конкретных условий техногенного зачачивания и наличия объектов культурного наследия.

4. Полученные результаты обладают существенной практической значимостью для строительного сектора, поскольку разработанные подходы позволяют минимизировать риски возникновения критических ситуаций в схожих условиях. Данная работа предлагает комплексный практико-ориентированный алгоритм действий (от экстренного обследования с помощью БПЛА до полной стабилизации), успешно апробированный на реальном аварийном объекте.

Список литературы / References

1. Зеркаль О.В. Оползни скольжения и оползни сдвига: особенности развития и типизация // Инженерная геология. 2021. Т. XVI, № 1. С. 38-58. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-1-38-58
Zerkal O.V. Sliding landslides and shear landslides: development features and typification // Engineering geology. 2021. Vol. XVI, No. 1. P. 38-58. DOI: 10.25296/1993-5056-2021-16-1-38-58
2. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Николаев С.В., Плечкова И.Л., Кузьмин А.А. Расчетная оценка опасности развития оползневого процесса // Инженерные изыскания. 2022. Т. 16, № 2. С. 18-33.
Shashkin A.G., Shashkin K.G., Nikolavtsev S.V., Plechkova I.L., Kuzmin A.A. Estimated assessment of the danger of landslide development // Engineering surveys. 2022. Vol. 16, No. 2. P. 18-33.
3. Богомолов А.Н., Офрихтер В.Г., Редин А.В., Богомолова О.А., Богомолов С.А. Оценка устойчивости нагруженного склона в сложных инженерно-геологических условиях // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13, № 4. С. 70-85. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.06
Bogomolov A.N., Ofrichter V.G., Redin A.V., Bogomolova O.A., Bogomolov S.A. Assessment of the stability of a loaded slope in difficult engineering and geological conditions // Construction and Geotechnics. 2022. Vol. 13, No. 4. P. 70-85. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.06
4. Сальный И.С., Пронозин Я.А., Бартоломей Л.А., Кудоманов М.В., Наумкина Ю.В. Растворы для формирования буринъекционных свай // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 4. С. 69-80. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.06
Salny I.S., Pronozin Ya.A., Bartolomey L.A., Kudomanov M.V., Naumkina Yu.V. Solutions for the formation of drilling piles // Construction and Geotechnics. 2020. Vol. 11, No. 4. P. 69-80. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.06
5. Ter-Martirosyan A.Z., Cherkesov R.H., Isaev I.O., Filaretov N.A., Vanina Yu.V. Computer modeling of the interaction of the building underground part with the soil foundation during the karst cavity formation on the example of the administrative and business center construction // Construction and Geotechnics. 2023. V. 14, No. 3. P. 80-91.
6. Гуня А.Н., Гакаев Р.А., Бадаев С.В. Ландшафтно-оползневое районирование территории чеченской республики и мероприятия по оптимизации динамики оползнеобразования // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2022. Т. 16, № 4. С. 30-37.
Gunya A.N., Gakaev R.A., Badaev S.V. Landscape-landslide zoning of the territory of the Chechen Republic and measures to optimize the dynamics of landslide formation //

- News of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences. 2022. Vol. 16, No. 4. P. 30-37.
7. Чарланова Д.С., Терехова О.П. Усиление оснований реконструируемых зданий буроинъекционными сваями // Вестник науки. 2022. Т. 3, № 1(46). С. 161-164.
Charlanova D.S., Terekhova O.P. Reinforcement of the basements of reconstructed buildings with drilling piles // Bulletin of Science. 2022. Vol. 3, No. 1(46). P. 161-164.
 8. Соколов Н.С. Укрепление оползневого склона // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 44–55. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-44-55
Sokolov N.S. Reinforcement of the landslide slope // Building materials. 2018. No. 11. P. 44-55. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-765-11-44-55
 9. Габибов Ф.Г., Зейналов А.З., Байрамова К.К. Прогноз времени возникновения оползневых подвижек // Вестник МАНЭБ. 2023. Т. 28, № 3. С. 159-163.
Gabibov F.G., Zeinalov A.Z., Bayramova K.K. Forecast of the time of landslide movements occurrence // Bulletin of International Academy of Sciences of Ecology, Human and Environmental Safety. 2023. Vol. 28, No. 3. P. 159-163.
 10. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки окружающей застройки при устройстве ограждений глубоких котлованов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 1. С. 7-12.
Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological settlement of surrounding buildings during the construction of fences in deep pits // Basements, foundations and soil mechanics. 2023. No. 1. P. 7-12.
 11. Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Прогнозирование деформаций оснований окружающей застройки с учетом технологической осадки // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 6 (994). С. 68-69.
Ilyichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecasting deformations of the foundations of surrounding buildings taking into account technological settlement // BST: Bulletin of Construction Machinery. 2017. No. 6 (994). P. 68-69.
 12. Сократов С.А., Сучилин А.А., Шныпарков А.Л., Ушакова Л.А., Воскресенский И.С., Белая Н.И. Применение беспилотных летательных аппаратов для геоморфологического картографирования оползневых склонов хребта Аибга (Западный Кавказ) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28, № 1. С. 480-495. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-480-495
Sokratov S.A., Suchilin A.A., Shnyparkov A.L., Ushakova L.A., Voskresensky I.S., Belaya N.I. The use of unmanned aerial vehicles for geomorphological mapping of landslide slopes of the Aibga ridge (Western Caucasus) // The intercart. InterGIS. 2022. Vol. 28, No. 1. P. 480-495. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-480-495
 13. Ozturk U., Bozzolan E., Holcombe E.A. et al. Can global rainfall estimates (satellite and reanalysis) aid landslide hindcasting? // Landslides. 2022. Vol. 19, iss. 5. P. 1273-1288. DOI: 10.1007/s10346-022-01856-0
 14. Turner D., Lucieer A., De Jong S.M. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // Remote Sensing. 2015. Vol. 7, iss. 2. P. 1736–1757. DOI: 10.3390/rs70201736
 15. Li A.J., Lyamin A.V., Cassidy M.J. et al. Three-Dimensional Slope Stability Assessment of Two-Layered Undrained Clay // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2020. Vol. 146, iss. 4. Article 04020010. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002213
 16. Wang L., Wu C., Gu X. et al. Probabilistic stability analysis of earth dam slope under transient seepage using multivariate adaptive regression splines // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2020. Vol. 79. P. 2763–2775. DOI: 10.1007/s10064-020-01730-0
 17. Tschuchnigg F., Schweiger H.F. The embedded pile concept for modelling reinforced soil walls in PLAXIS // Geomechanics and Engineering. 2020. Vol. 21, No. 4. P. 365-377. DOI: 10.12989/gae.2020.21.4.365

Информация об авторах

Епифанцева Лариса Рафаиловна, кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация.

Email: epifantsevalr@tyuiu.ru, ORCID: 0009-0001-0285-2667

Кайгородов Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация.

Email: kajgorodovmd@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-4671-5541

Киселев Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация.

Email: kiselevnj@tyuiu.ru, ORCID: 0009-0007-5643-0447

Наумкина Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация.

Email: naumkinajv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0003-2853-7531

Прозин Яков Александрович, доктор технических наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация.

Email: geofond.tgasu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6173-2796

Information about the authors

Larisa R. Epifantseva, candidate of technical sciences, associate professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation.

Email: epifantsevalr@tyuiu.ru, ORCID: 0009-0001-0285-2667

Mikhail D. Kaigorodov, candidate of technical sciences, associate professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation.

Email: kajgorodovmd@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-4671-5541

Nikita Yu. Kiselev, candidate of technical sciences, Associate Professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation.

Email: kiselevnj@tyuiu.ru, ORCID: 0009-0007-5643-0447

Yulia V. Naumkina, candidate of technical sciences, associate professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation.

Email: naumkinajv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0003-2853-7531

Yakov A. Pronozin, doctor of technical sciences, professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation.

Email: geofond.tgasu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6173-2796

Дата поступления: 17.06.2025

Дата принятия: 26.12.2025