

УДК 699.83

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.Н. Фам¹, А.Н. Триеу¹, Т.Т. Дан²

¹ Университет Туйлой, г. Ханой (Вьетнам)

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. Оценка устойчивости склонов является важной проблемой в геотехнической инженерии, особенно в районах с высоким риском оползней из-за сильных или продолжительных дождей. В этом исследовании анализируется влияние различных типов осадков на устойчивость склонов посредством численного моделирования с использованием модулей SEEP/W и SLOPE/W в программном обеспечении Geostudio 2024. Моделируются три сценария дождя, включая: (1) периодический проливной дождь, (2) непрерывный морозящий дождь и (3) интенсивные ливни. Результаты показывают, что интенсивность и продолжительность осадков оказывают существенное влияние на поровое давление грунта и коэффициент запаса прочности (FOS) склонов. В частности, периодические проливные дожди приводят к снижению общей устойчивости из-за недостаточного восстановления состояния массива в засушливые периоды. Непрерывный морозящий дождь вызывает перенасыщение грунта и постепенно снижает прочность на сдвиг. Интенсивные ливни быстро ухудшают FOS, но система может восстановиться при условии эффективного водоотведения.

Ключевые слова: устойчивость склонов, осадки, поровое давление воды, коэффициент запаса прочности, Geostudio, численное моделирование.

Ссылка для цитирования: Фам Т.Н., Триеу А.Н., Дан Т.Т. Влияние различных видов атмосферных осадков на устойчивость склонов: анализ с помощью численного моделирования // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 3-12. EDN: XZDYCQ

INFLUENCE OF PRECIPITATION TYPES ON SLOPE STABILITY: ANALYSIS USING NUMERICAL MODELING

T.N. Pham¹, A.N. Trieu¹, T.T. Dang²

¹ Thuyloi University, Ha Noi (Vietnam)

² Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Slope stability is an important factor in geotechnical engineering, especially in areas with high risk of landslides due to heavy or prolonged rainfall. This study analyzes the effects of different rainfall types on slope stability through numerical simulation using SEEP/W and SLOPE/W modules in Geostudio 2024 software. Three rainfall scenarios are simulated, including: (1) intermittent heavy rainfall, (2) continuous drizzle, and (3) intense rainfall. The results show that rainfall intensity and duration have a significant effect on the pore water pressure and factor of safety (FOS) of slopes. Specifically, intermittent heavy rainfall leads to cumulative steady decline due to insufficient recovery of drought cycles. Prolonged rainfall causes soil supersaturation and gradually reduces the shear strength. Intense rainfall quickly destroys FOS, the system can recover under the condition of effective drainage.

Keywords: slope stability, precipitation, pore water pressure, factor of safety, Geostudio, numerical modeling.

For citation: Pham T.N., Trieu A.N., Dang T.T. Influence of precipitation types on slope stability: analysis using numerical modeling // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 3-12. EDN: XZDYCQ

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость склонов является важным фактором в геотехнической инженерии, особенно в районах, подверженных развитию оползневых процессов. На устойчивость склонов влияют многие факторы, такие как свойства массива грунта, геологическое строение территории, растительность, атмосферные осадки, гидрологические и гидрогеологические условия и т.д. Среди перечисленных параметров осадки широко признаны одной из основных причин обрушения склонов, прежде всего в районах с частыми или продолжительными сильными дождями. Проникновение дождевой воды в массив грунта увеличивает поровое давление воды и уменьшает всасывание глинистой матрицы, что приводит к снижению прочности грунта на сдвиг и увеличению риска потери устойчивости и обрушения склонов.

Влияние выпадения осадков на устойчивость склонов широко изучалось ранее, но основное внимание уделялось влиянию интенсивности и продолжительности осадков. Многие исследования показали, что ливни высокой интенсивности могут быстро привести к обрушению склонов из-за водонасыщения грунтов, увеличения порового давления воды и снижения прочности грунта на сдвиг. Рахарджо и др. (2001) провели всесторонний анализ обрушений склонов из-за сильных дождей, подчеркнув, что быстрая инфильтрация может вызвать значительное увеличение порового давления воды, что приведет к неглубоким оползням [1]. Аналогичным образом, Нг и Ши (1998) исследовали влияние продолжительных дождей на устойчивость склонов, показав, что продолжительные периоды дождей могут привести к накоплению влаги в грунте, уменьшению всасывания грунта и увеличению вероятности оползней [2].

Помимо интенсивности дождя, важным фактором, влияющим на устойчивость склона, также считается его продолжительность. Исследования Годта и др. (2006) и Цая (2008) показывают, что продолжительные дожди, хотя и меньшей интенсивности, могут привести к формированию глубоких оползней, поскольку вода продолжает проникать в массив грунта [3, 4]. Эти исследования подчеркивают, что кумулятивный эффект осадков с течением времени так же важен, как и пиковая интенсивность, способствуя постепенному сползанию склона.

В недавних исследованиях также изучались меры по минимизации воздействия осадков на устойчивость склонов. Хуанг (2023) продемонстрировал, что микробное усиление может смягчить неблагоприятное воздействие инфильтрации ливневых вод на песчаные склоны, повышая стабильность за счет уменьшения областей отрицательного давления поровой жидкости [5]. Этот результат согласуется с данными Чжана и др. (2023), которые провели эксперименты с физической моделью, показавшие, что сильный дождь может вызвать механизмы разрушения выветриваемых базальтовых грунтов, подчеркивая важность понимания состава и структуры грунта в зависимости от осадков [6]. Криснанто и др. (2021) выделили два типа потери устойчивости склонов, основанные на изменениях уровня грунтовых вод во время осадков, показав, что значительное увеличение уровня грунтовых вод приводит к потере всасывания глинистого матрикса и появлению положительного давления воды, существенно влияющих на устойчивость склонов [7].

Кроме того, устойчивость ненасыщенных грунтов особенно чувствительна к изменениям интенсивности осадков. Ли и Ду (2023) обнаружили, что не глубоко залегающие грунты на склонах сильно реагируют на изменения интенсивности осадков, что позволяет предположить, что даже умеренные осадки могут существенно повлиять на устойчивость при некоторых условиях [8]. Озчелик и Сельчук (2022) с помощью параметрического анализа подтвердили, что увеличение интенсивности осадков коррелирует с уменьшением устойчивости склонов [9]. Чжао и др. (2022) исследовали совместное влияние давления поровой жидкости и силы тяжести в ненасыщенных грунтах, подтвердив мнение о том, что вызванные дождем изменения в динамике поровой жидкости важны для оценки устойчивости склонов [11].

Хотя эти исследования дают ценную информацию об общем влиянии осадков на устойчивость склонов, они в первую очередь рассматривают осадки как однородное и непрерывное явление, уделяя особое внимание экстремальным значениям интенсивности и интенсивности во времени. Этот подход чрезмерно упрощает сложные взаимодействия между количеством осадков и устойчивостью склонов, особенно если принять во внимание разнообразные режимы выпадения осадков в природе. Большинство современных исследований не делают различия между непрерывным сильным дождем, прерывистыми ливнями или продолжительным небольшим дождем - каждый из которых может иметь различное влияние на инфильтрацию и последующие изменения давления воды в порах грунта и его влажность. Указанное допущение является существенным ограничением. Различные условия выпадения осадков могут привести к отличным обстановкам водонасыщения грунтовых массивов, по-разному изменяя свойства грунтов.

Таким образом, цель данного исследования — устранить указанный выше недостаток путем изучения того, как различные режимы выпадения осадков влияют на устойчивость склонов. В частности, цель исследования состояла в анализе изменения давления поровой жидкости и влажности грунта при различных сценариях выпадения осадков и их влияние на устойчивость склонов. Численное моделирование в программе Geostudio позволяет обеспечить всестороннее понимание взаимосвязи между характером осадков и устойчивостью склонов, что важно для разработки более точных моделей прогнозирования устойчивости склонов и выбора методов их закрепления.

Численная модель в исследовании способна воспроизвести несколько сценариев выпадения атмосферных осадков, включая прерывистый дождь, непрерывный небольшой дождь и кратковременный сильный дождь. Ожидается, что результаты приведут к лучшему пониманию сложных взаимодействий между количеством осадков и устойчивостью склонов, что позволит, в конечном счете, разрабатывать технически обоснованные меры по снижению рисков развития оползней и других связанных с этим процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные исследования. Место проведения исследования — провинция Йенбай, Северный Вьетнам. Провинция Йенбай, расположенная в Северном Вьетнаме, является подходящим местом для изучения влияния осадков на устойчивость склонов из-за ее гористой местности и подверженности сильным ливням, особенно в сезон дождей. В этом районе произошло множество оползней, часто вызванных экстремальными погодными явлениями, что делает его важным районом с точки зрения изучения рассматриваемой проблемы.

Рельеф: Эта территория характеризуется крутыми склонами высотой от 200 до 2000 метров над уровнем моря. Крутой рельеф в сочетании с обильными дождями создает условия, в которых высока вероятность формирования оползней (рис.1).

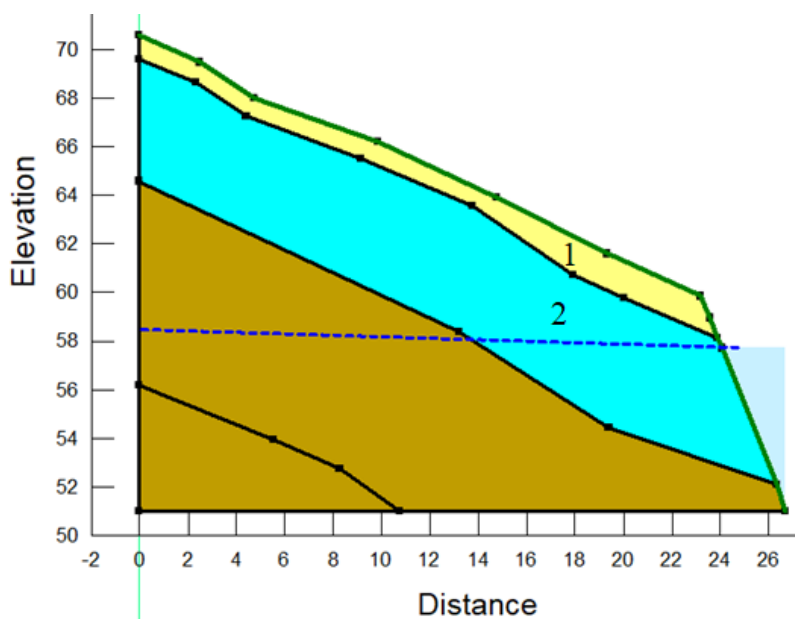


Рис. 1. Типичный инженерно-геологический разрез в районе провинция Йенбай, использованный в настоящем исследовании

Fig. 1. Typical cross-section used in the study

Как правило, в инженерно-геологическом разрезе преобладают глинистые илы и выветрившиеся породы. Низкая водопроницаемость и высокая пластичность грунтов являются основными факторами, влияющими на устойчивость склонов, особенно в условиях водонасыщения. Физико-механические характеристики слоев грунтов представлены в табл.1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики слоев массива грунта
Table 1. Physical and mechanical properties of soil layers

Характеристики	Обозначение	Слой 1	Слой 2
Удельный вес влажного грунта, кН/м ³	γ_w	16,95	17,00
Удельный вес водонасыщенного грунта, кН/м ³	γ_s	17,58	17,66
Угол внутреннего трения, градус	φ	18,29	24,36
Сцепление, кН/м ²	c	20,20	18,50
Коэффициент фильтрации, см/с	k	$9,59 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-5}$

В Йенбай наблюдается отчетливый сезон муссонов с мая по октябрь, в течение которого на этот район выпадает большая часть годового количества осадков. Во время экстремальных явлений интенсивность осадков может достигать 300 мм/день. В регионе наблюдаются разнообразные режимы выпадения осадков, включая непрерывный морозящий дождь, периодический проливной дождь и короткие интенсивные ливни. Как было указано ранее, такие условия выпадения осадков позволяют оценить влияние различных типов осадков на устойчивость склонов.

Метод исследования. Влияние осадков оценивалось по изменению распределения порового давления воды на склоне [12, 17-19]. Для анализа устойчивости склонов использовался детерминированная модель устойчивости склонов путем интеграции двух модулей SEEP/W и SLOPE/W в программном обеспечении GEOSTUDIO 2024.

Для оценки устойчивости склонов были предприняты три шага: 1) модуль SEEP/W использовался для моделирования порового давления воды; 2) затем модуль SLOPE/W применялся для определения критической поверхности скольжения и расчета коэффициента запаса прочности (FOS) в переходных условиях PWP.

Seep/w использует закон Дарси и уравнения потока для моделирования фильтрации жидкости в грунте. Указанный закон представляет собой линейную модель, которая описывает взаимосвязь между скоростью потока через водонасыщенный слой грунта и гидравлическим градиентом, действующим в этом слое [13-15]:

$$V = q/A = kJ, \quad (1)$$

где:

q – удельный расход фильтрующегося потока;

A – площадь поперечного сечения фильтрующегося потока;

k – коэффициент фильтрации;

J – гидравлический уклон;

V – скорость фильтрационного потока.

Общее дифференциальное уравнение двумерной фильтрации можно выразить следующим образом (2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

где:

H – напор фильтрующегося потока;

k_x – коэффициент фильтрации в направлении x ;

k_y – коэффициент фильтрации по направлению y ;

Q – расход фильтрующегося потока;

θ – гидратированный объем;

t – время.

Для анализа устойчивости модуль Slope/w использует упрощенный метод Бишоп, чтобы найти коэффициент запаса прочности (FOS). Этот метод учитывает нормальную силу между слоями грунтов, игнорируя при этом касательную силу между ними ($X=0$). Чтобы вычислить нормальную силу у основания каждой поверхности среза, Бишоп предложил новое уравнение (3), складывая вертикальные касательные [20]:

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[\frac{c\beta + W \tan \varphi - \frac{c\beta}{FS} \sin \alpha \tan \varphi}{m_\alpha} \right], \quad (3)$$

где:

c - сцепление;

φ - угол внутреннего трения;

W - вес полосы земли;

β - геометрические параметры;

α - наклон среза.

Сценарий моделирования. В регионе наблюдаются разнообразные режимы выпадения осадков, включая непрерывный морозящий дождь, периодический проливной дождь и короткие интенсивные ливни. В статье проведены расчеты для 3 сценариев:

Сценарий 1. Периодический проливной дождь со скоростью 100 мм/ч в течение 2 часов, за которым следует 4-часовой засушливый период, повторяющийся в течение 10 дней.

Сценарий 2. Непрерывный морозящий дождь со скоростью 10 мм/час в течение 72 часов подряд.

Сценарий 3. Короткие интенсивные ливни, представляющие собой сильный дождь за короткий период времени, 300 мм за 12 часов. На рис.2 представлена иллюстрация моделирования непрерывного морозящего дождя для сценария 2.

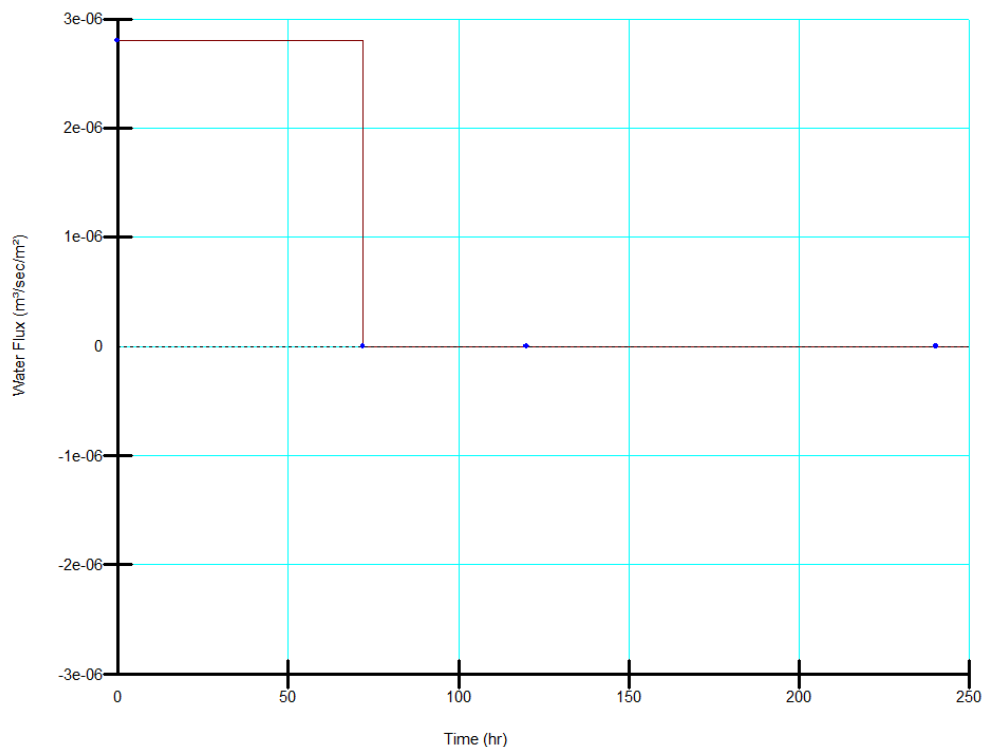


Рис. 2. Иллюстрация моделирования непрерывного морозящего дождя для сценария 2
Fig. 2. Illustration of continuous drizzle simulation for scenario 2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

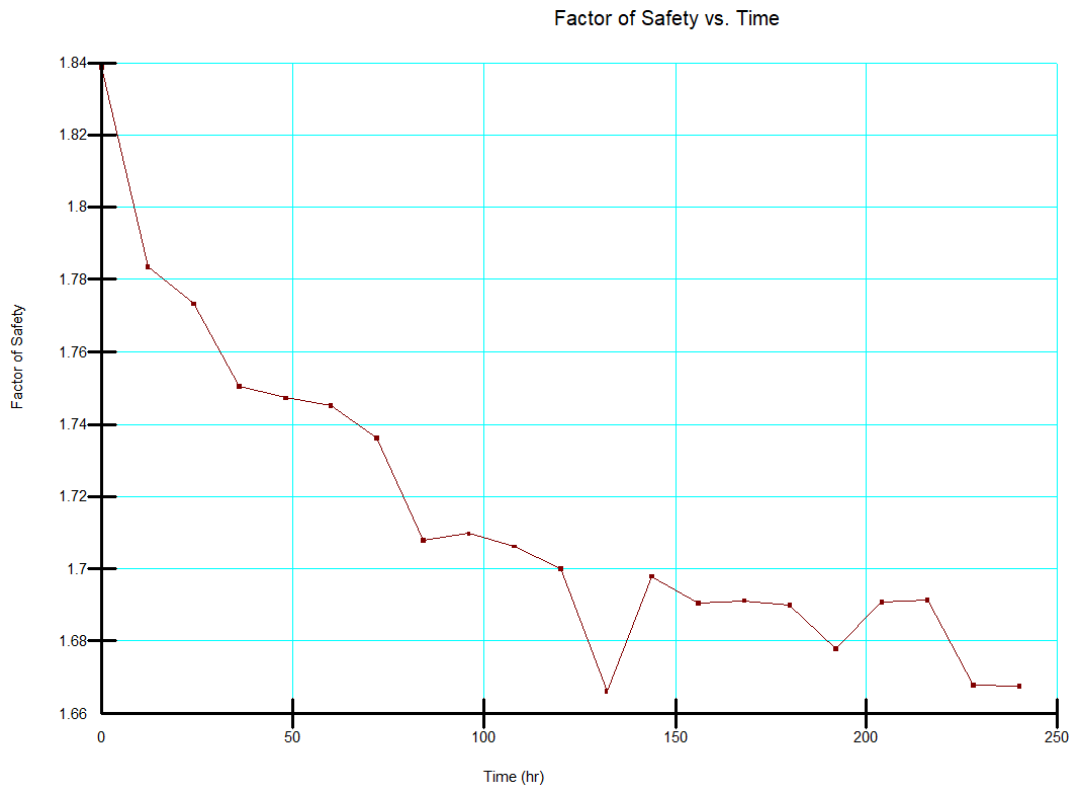


Рис. 3. Результаты расчета коэффициента запаса прочности для сценария 1
Fig. Calculation result of the factor of safety for scenario 1

Для сценария 1 коэффициент безопасности (FOS) постепенно снижается с течением времени, отражая негативное влияние периодических сильных дождей на стабильность системы (рис. 3). На ранних стадиях (0–50 часов) FOS резко снизился с 1,84 до 1,74, главным образом за счет инфильтрации воды, увеличивающей поровое давление, вызывающей снижение стабилизирующей силы. На промежуточной фазе (50–150 часов) наблюдается более медленный темп снижения, поскольку система начинает адаптироваться к циклу дождей и засухи. Однако восстановления в засушливые периоды (4 часа) было недостаточно, чтобы обратить вспять совокупное воздействие дождей, в результате чего FOS упал примерно до 1,70. На заключительном этапе (150–240 ч) FOS незначительно колебался и стабилизировался на низком уровне (1,68–1,70), что свидетельствует о достижении в системе временного равновесия между инфильтрацией и дренажом воды.

Результаты также показывают, что период высыхания массива между дождями недостаточно велик, чтобы снизить поровое давление и восстановить исходные условия. Повторяющиеся циклы выпадения осадков и засухи значительно ухудшают общую устойчивость изучаемой природной системы, подчеркивая необходимость эффективных мер по управлению водными ресурсами для минимизации рисков во время периодических сильных дождей.

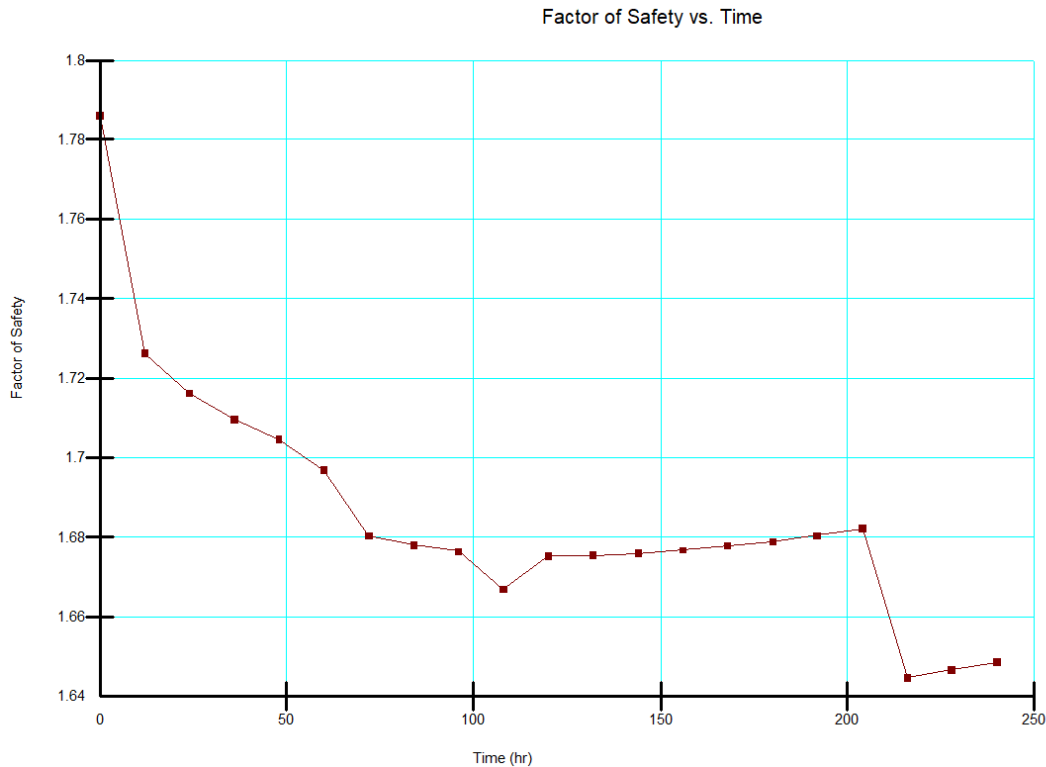


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента запаса для сценария 2
Fig. 4. Calculation result of the factor of safety for scenario 2

Для сценария 2 при воздействии на склон непрерывного морозящего дождя малой интенсивности, получается явное снижение коэффициента запаса прочности (FOS) (рис.4). Первоначально FOS резко снизился, затем временно стабилизировался, а затем внезапно снизился на заключительном этапе, отражая совокупный эффект просачивания воды в грунт, увеличения порового давления и снижения сопротивления массива сдвигу.

На ранних стадиях FOS снизился с 1,78 до 1,68, главным образом, за счет глубокого проникновения дождевой воды в грунт, вызывающего повышение порового давления и снижение начальной устойчивости, особенно в условиях плохого дренажа. В промежуточной фазе (50–200 ч) наблюдалась небольшая стабилизация FOS около 1,66–1,68, что соответствует временное равновесие между инфильтрацией и дренажом воды. Однако стабильный уровень все еще значительно ниже первоначального из-за кумулятивного воздействия дождевой воды. На заключительном этапе FOS внезапно падает ниже 1,65, возможно, из-за водонасыщения и местной потери устойчивости, что увеличивает риск формирования оползня, если не будут приняты меры по закреплению склона.

Результаты анализа показывают, что непрерывный дождь, даже небольшой интенсивности, может со временем оказать серьезное влияние на устойчивость склона. Необходимы эффективные меры водоотведения (дренажа) и контроль порового давления, чтобы свести к минимуму риск потери устойчивости во время продолжительных дождей.

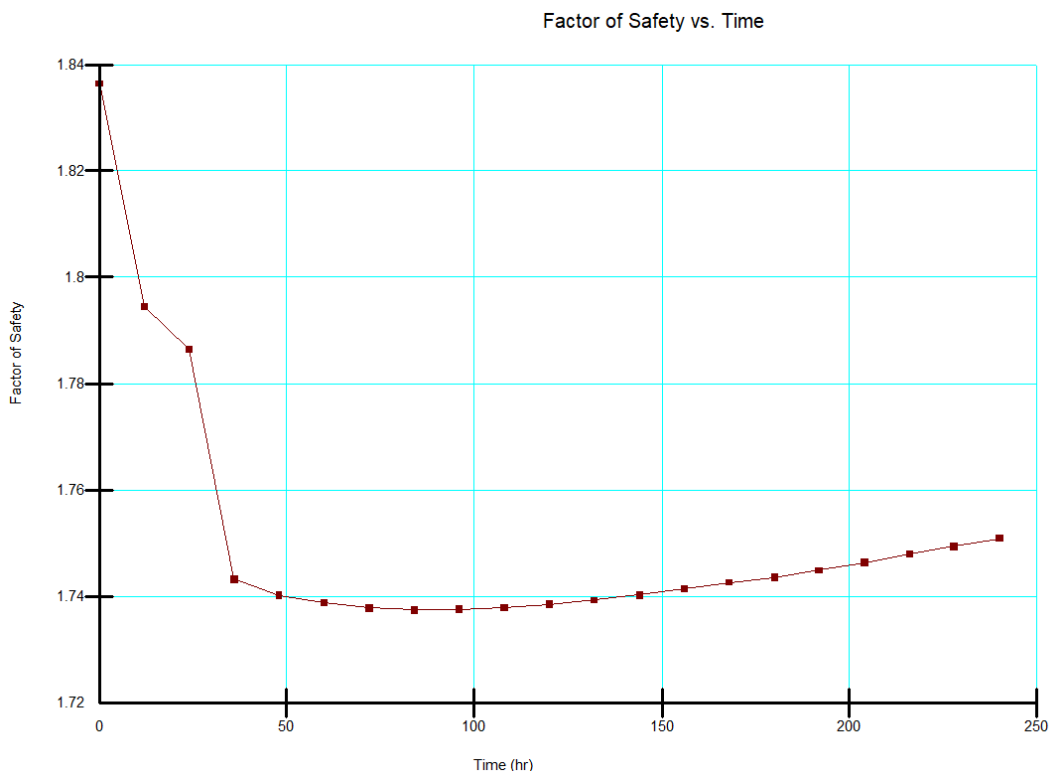


Рис. 5. Результаты расчета коэффициента запаса для сценария 3
Fig.5. Calculation result of the factor of safety for scenario 3

Полученные результаты показывают, что фактор безопасности (FOS) резко снижался на ранних стадиях воздействия интенсивных ливней, затем стабилизировался на низком уровне и постепенно восстанавливался на заключительном этапе (рис.5). Эта тенденция демонстрирует немедленное воздействие краткосрочных сильных дождей на стабильность системы с возможностью восстановления после того, как воздействие утихнет.

В течение первых 50 часов FOS быстро снизился с 1,84 до 1,74 из-за резкого увеличения порового давления из-за быстрой инфильтрации воды, снижающей сопротивление грунта сдвигу и вызывающей нестабильность. По истечении этого периода FOS оставался стабильным на уровне 1,72–1,74, показывая, что система достигла временного баланса между инфильтрацией воды и поровым давлением. Однако низкий стабильный уровень на данном этапе по-прежнему представляет собой риск уязвимости к другим дождям или дополнительным нагрузкам.

Начиная со 150 часа, FOS медленно увеличивался с 1,74 до почти 1,76, отражая процесс дренирования и снижение порового давления с течением времени. Это показывает, что система способна к самовосстановлению, хотя этот процесс зависит от времени и эффективности дренажа.

Результаты показывают, что интенсивные ливни могут вызвать быструю потерю устойчивости, но система способна постепенно восстанавливаться, если эффективно отводить лишнюю воду. Это подчеркивает роль мер по управлению водными ресурсами в минимизации рисков и обеспечении безопасности системы во время кратковременных сильных дождей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом исследовании было проанализировано влияние различных типов осадков на устойчивость склонов посредством численного моделирования с использованием Geostudio 2024. Результаты показывают, что интенсивность и продолжительность осадков играют важную роль во влиянии на устойчивость склона, при этом эффекты разных типов осадков совершенно разные.

При **периодическом проливном дожде** быстрое проникновение дождевой воды приводит к увеличению порового давления воды, снижая прочность грунта на сдвиг. Попеременный сухой цикл недостаточен для восстановления исходного состояния, что приводит с течением времени к значительному снижению коэффициента запаса прочности (FOS). Это подчеркивает риск кумулятивной нестабильности в условиях частых периодических дождей.

В случае **непрерывного морозящего дождя**, даже несмотря на то, что интенсивность осадков

невелика, накопление влаги в грунте с течением времени все равно приводит к постепенному снижению FOS. Этот результат показывает, что продолжительный дождь может вызвать местное водонасыщение, постепенно ослабляя сопротивление сдвигу грунта и увеличивая риск потери устойчивости склонов, особенно на плохо дренированных участках.

В случае **интенсивных ливней** быстрое снижение FOS на ранних стадиях отражает непосредственный эффект кратковременного сильного дождя. Однако, если дренажная система работает эффективно, последующая стабилизация может свести к минимуму риск оползней.

Представленные результаты подтверждают, что учет различных режимов выпадения осадков необходим для более точной оценки устойчивости склонов в реальных условиях. В частности, в исследовании подчеркивается важная роль мер по управлению водными ресурсами, таких как проектирование дренажной системы и снижение порового давления воды, чтобы минимизировать риск нестабильности склонов из-за осадков.

Это исследование обеспечивает важную научную основу для разработки моделей прогнозирования и эффективных мер управления земельными ресурсами в контексте усиливающегося изменения климата. Расширение проведенных исследований на других инженерно-геологических условиях и ландшафты будет способствовать дальнейшему выяснению сложных взаимосвязей между количеством осадков и устойчивостью склонов.

В дальнейшем планируется выполнить обратный анализ потери устойчивости склонов, зафиксированной *in situ*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rahardjo H., Li X. W., Toll D. G., Leong E. C. The effect of antecedent rainfall on slope stability // *Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice*. 2001. С. 371–399.
2. Ng C. W. W., Shi Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage // *Computers and geotechnics*. 1998. Т. 22. № 1. С. 1–28.
3. Godt J. W., Baum R. L., Chleborad A. F. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA // *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 2006. Т. 31. № 1. С. 97–110.
4. Tsai T. L. The influence of rainstorm pattern on shallow landslide // *Environmental Geology*. 2008. Т. 53. С. 1563–1569.
5. Huang M., Zhang Y., Hu J., Hei Y., Xu Z., Su J. Experimental Study on Pore Pressure Variation and Erosion Stability of Sandy Slope Model under MICP. 2023.
6. Zhang Q., Luo Z., Chen Y., Wang Z. Physical Model Experiments on Failure Mechanism on Slopes of Weathered Basalt Soils during Heavy Rainfall Events // *Materials*. 2023. Т. 16. № 2. С. 832.
7. Krisnanto S., Rahardjo H., Kartiko R. D., Satyanaga A., Nugroho J., Mulyanto N., Rachma S. N. Characteristics of rainfall-induced slope instability in Cisokan region, Indonesia // *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2021.
8. He Y., Li B., Du X. Soil slope instability mechanism and treatment measures under rainfall - A case study of a slope in Yunda Road // *Sustainability*. 2023. Т. 15. № 2. С. 1287.
9. Özçelik F. V., Selçuk M. E. Parametric Analysis of Factors that Affects the Rainfall Induced Slope Stability // *Turkish Journal of Geosciences*. 2022. Т. 3. № 2. С. 49–57.
10. Zhao N., Lu H., Zhang R. The Coupling Effect of Pore Water Pressure and Pore Water Gravity in Unsaturated Soils under Rainfall Condition and Its Influence on Slope Stability // *Geofluids*. 2022. Т. 2022. № 1. С. 9492514.
11. Satyanaga A., Rahardjo H. Role of unsaturated soil properties in the development of slope susceptibility map // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 2022. Т. 175. № 3. С. 276–288.
12. Jassam M. G., Abdulrazzaq S. S., Khalaf W. D. Seepage characteristics analysis through homogeneous earth dams using theoretical model of SEEP/W program // *J. Crit. Rev.* 2020. Т. 7. С. 5984–5996.
13. Schweizer B. Darcy's law and groundwater flow modelling. 2015.
14. Knappett J., Craig R. F. Craig's soil mechanics. CRC press. 2019.
15. Fredlund D. G. The stability of slopes with negative pore-water pressures. 1995.
16. Fredlund D. G., Morgenstern N. R., Widger R. A. The shear strength of unsaturated soils // *Canadian geotechnical journal*. 1978. Т. 15. № 3. С. 313–321.
17. Fredlund D. G., Rahardjo H. An overview of unsaturated soil behaviour // *Geotechnical special publication*. 1993. С. 1–1.
18. Fredlund M. D., Sillers W. S., Fredlund D. G., Wilson G. W. Design of a knowledge-based system for unsaturated soil properties. 1996. С. 659–677.
19. Petterson K. E. The early history of circular sliding surfaces // *Geotechnique*. 1955. Т. 5. № 4. С. 275–296.
20. Bishop A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // *Geotechnique*. 1955. Т. 5. № 1. С. 7–17.

ОБ АВТОРАХ

Нгок Тхинь Фам – Университет Туйлой, 175 Тай Сон, Донг Да, Ханой (Вьетнам). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

Ань Нгок Триеу – Университет Туйлой, 175 Тай Сон, Донг Да, Ханой (Вьетнам)

Тьу Тхао Данг – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: dangthuthao90@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Thinh Ngoc Pham – Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Ha Noi (Vietnam). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

Anh Ngoc Trieu – Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Ha Noi (Vietnam)

Thu Thao Dang – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: dangthuthao90@gmail.com