

ОЦЕНКА ПРИКЛАДНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ CHASM ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЫ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ УКРЕПЛЯЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

***Кильмаматова К.Н., Муравьева Е.В.**

ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань, e-mail: KNKilmamatova@kai.ru

Аннотация. Целью данного исследования является оценка прикладного применения модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона для расчета характеристик устойчивости почвы при планировании укрепляющих сооружений. Рассматривается анализ точности и надежности модели, возможность практического применения, сравнение с альтернативными методами и рекомендации по использованию модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона в практических исследованиях. Основные методы исследований, приведенные в статье – аналитический и сравнительный анализ. Представлено описание модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона, виды собираемых данных и методы их анализа, формы тестирования модели. Оцениваются возможности практического применения. Проводится анализ точности модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона, определяются ключевые факторы устойчивости почвы. Рассматривается практическое применение модели, сравнение с альтернативными методами и перспективы дальнейшего использования. Модель Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона имеет высокую точность в классификации склонов и может быть полезна для диагностики рисков, связанных с оползнями. При совершенствовании алгоритмов модель сохранит эффективность в условиях меняющегося климата и растущего градостроительства.

Ключевые слова: Модель Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона, склон, оценка устойчивости, анализ надежности, оползни, устойчивость

EVALUATION OF THE APPLICATION OF THE CHASM MODEL FOR CALCULATING SOIL STABILITY CHARACTERISTICS IN THE PLANNING OF REINFORCING STRUCTURES

#Kilmamatova K. N., Muraveva E. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI», Kazan, e-mail: KNKilmamatova@kai.ru

Abstract. The purpose of this study is to evaluate the application of the model of Combined Hydrology and Slope Stability to calculate the characteristics of soil stability in the planning of fortifications. The analysis of the accuracy and reliability of the model, the possibility of practical application, comparison with alternative methods and recommendations for using the model of Combined Hydrology and Slope Stability in practical research are considered. The main research methods given in the article are analytical and comparative analysis. The description of the model of Combined Hydrology and Slope Stability, types of data collected and methods of their analysis, forms of model testing are presented. The possibilities of practical application are evaluated. The accuracy of the model of Combined Hydrology and Slope Stability is analyzed, and key factors of soil stability are determined. The practical application of the model, comparison with alternative methods and prospects for further use are considered. The Combined Hydrology and Slope Stability model has high accuracy in slope classification and can be useful for diagnosing landslide risks. With improved algorithms, the model will remain effective in a changing climate and growing urban development.

Keywords: Combined Hydrology and Slope Stability Model, slope, stability assessment, reliability analysis, landslides, stability.

Введение. Оползни представляют собой значительную угрозу для безопасности и инфраструктуры, особенно в районах с холмистым и гористым рельефом. Эти природные явления могут приводить к разрушению зданий, повреждению транспортных путей и линий связи, а также

к угрозе жизни людей. Для эффективного управления рисками, связанными с оползнями, необходимы точные методы анализа устойчивости склонов.

В соответствии с прогнозом развития экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации от

Центра государственного мониторинга состояния недр и региональных работ в Татарстане необходимо обратить внимание на высокую активность оползневых процессов.

Эффективное моделирование устойчивости склонов играет ключевую роль в прогнозировании и управлении рисками оползней. Модель Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM – Combined Hydrology And Slope Stability Model) предлагает комплексный и физически обоснованный подход к оценке факторов, влияющих на устойчивость склона.

Модель CHASM объединяет несколько ключевых аспектов, влияющих на устойчивость склонов:

- Гидрологические условия. Модель учитывает влияние воды на склоны, включая инфильтрацию, сток и эрозию. Это позволяет более точно оценить, как изменения в уровне влажности могут повлиять на стабильность склона;

- Механические свойства грунта. CHASM анализирует механические свойства грунта, такие как плотность, пористость и прочность на сдвиг. Эти параметры помогают определить, насколько склон подвержен деформациям и разрушениям;

- Геологические условия. Модель учитывает геологические особенности склона, включая наличие трещин, слоев различных типов грунта и подземных вод. Это позволяет более точно оценить риски, связанные с геологическими структурами;

- Климатические условия. CHASM принимает во внимание климатические факторы, такие как осадки, температура и влажность, которые могут влиять на состояние склонов.

Модель CHASM использует сложные алгоритмы и численные схемы для анализа данных и прогнозирования устойчивости склонов. Основные этапы работы модели включают:

- Сбор данных.
- Моделирование гидрологических процессов.
- Анализ механических свойств грунта.

- Интеграция данных и моделирование устойчивости.

- Прогнозирование и анализ рисков.

Результаты применения модели CHASM в различных регионах, включая Гонконг и страны Юго-Восточной Азии (особо подверженные оползневым процессам), продемонстрировали ее высокую эффективность. Модель точно классифицирует устойчивые и неустойчивые склоны, что позволяет инженерам и исследователям принимать более обоснованные решения по управлению рисками.

Разработка и применение модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) является важным шагом в управлении рисками, связанными с оползнями. Эта модель предоставляет инженерам и исследователям мощный инструмент для анализа устойчивости склонов и прогнозирования возможных оползней. Благодаря своей комплексности и точности, CHASM становится незаменимым помощником в обеспечении безопасности и стабильности инфраструктуры в районах с высоким риском оползней.

Целью исследования является оценка прикладного применения модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) для расчета характеристик устойчивости почвы при планировании укрепляющих сооружений, а также возможность применения метода оценки устойчивости склона для прогноза геофизических опасных природных процессов.

В рамках исследования будут рассмотрены следующие аспекты:

- Анализ точности и надежности модели CHASM. Оценка способности модели предсказывать устойчивость склонов на основе данных, собранных в различных географических условиях.

- Идентификация ключевых факторов. Выявление наиболее значимых факторов, влияющих на устойчивость почвы, таких как гидрологические условия, механические свойства грунта и геологические особенности.

– Практическое применение модели. Исследование возможностей использования модели CHASM для разработки и оптимизации укрепляющих сооружений, таких как подпорные стенки, дренажные системы и геосинтетические материалы.

– Сравнение с альтернативными методами. Сопоставление результатов, полученных с помощью модели CHASM, с результатами других методов анализа устойчивости склонов для оценки преимуществ и ограничений каждого подхода.

– Рекомендации по использованию модели. Разработка практических рекомендаций для инженеров и исследователей по внедрению модели CHASM в процесс планирования и реализации укрепляющих мероприятий, направленных на снижение рисков оползней и повышение безопасности инфраструктуры.

Таким образом, данное исследование направлено на всестороннюю оценку возможностей и перспектив применения модели CHASM для повышения точности и надежности расчетов характеристик устойчивости почвы, что позволит более эффективно планировать и реализовывать укрепляющие сооружения в различных географических условиях.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели исследования были использованы следующие материалы и методы:

Основные методы исследования – аналитический и сравнительный анализ.

1) Описание модели.

Модель Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) представляет собой комплексную численную модель, которая учитывает гидрологические, механические и геологические факторы, влияющие на устойчивость склонов. Основные компоненты модели включают:

Гидрологические условия: моделирование инфильтрации, стока и эрозии.

Механические свойства грунта: анализ плотности, пористости и прочности на сдвиг.

Геологические условия: учет наличия трещин, слоев грунта и подземных вод.

Климатические условия: включение данных об осадках, температуре и влажности.

2) Сбор данных.

Для анализа устойчивости склонов с использованием модели CHASM были собраны следующие типы данных: гидрологические данные – в основном информация о количестве и распределении осадков, уровне грунтовых вод, а также данные о стоке и инфильтрации; механические свойства грунта - образцы грунта для лабораторных испытаний на плотность, пористость и прочность на сдвиг; геологические данные, такие, как сейсмические и георадарные исследования для определения структуры и состава склонов; климатические данные, а именно, метеорологические данные за длительный период времени для анализа климатических условий.

3) Методы анализа данных.

Для обработки и анализа собранных данных используются численное моделирование (применение модели CHASM для создания численных моделей устойчивости склонов), статистический анализ (использование статистических методов для оценки значимости различных факторов, влияющих на устойчивость) и сравнительный анализ (сопоставление результатов, полученных с помощью модели CHASM, с результатами других методов анализа устойчивости склонов).

4) Тестирование.

Для проверки точности и надежности модели CHASM были проведены следующие процедуры:

– Калибровка модели. Настройка параметров модели на основе собранных данных для достижения наилучшей точности прогнозов.

– Валидация модели. Сравнение результатов моделирования с фактическими данными об устойчивости склонов и оползневых процессах.

– Анализ чувствительности. Исследование влияния различных факторов на устойчивость склонов при изменении их значений.

5) Оценка возможности практического применения.

На основе полученных данных и результатов моделирования были разработаны рекомендации по использованию модели CHASM для планирования и реализации укрепляющих сооружений, таких как:

– Подпорные стенки. Проектирование и размещение подпорных стенок для предотвращения оползней.

– Дренажные системы. Разработка и оптимизация дренажных систем для снижения уровня грунтовых вод и уменьшения эрозии.

– Геосинтетические материалы. Использование геосинтетических материалов для укрепления склонов и повышения их устойчивости.

Таким образом, использование модели CHASM и комплексный подход к сбору и анализу данных позволяют достичь высокой точности и надежности в оценке устойчивости склонов, что является ключевым фактором для успешного планирования и реализации укрепляющих мероприятий.

Детерминированное физически обоснованное моделирование устойчивости склона раньше проводилось на месте исследования с использованием Модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) для диагностики факторов, вызывающих оползни, и оценки соотношения выгоды-затраты на смягчение последствий оползней. В ходе проверки реализации в Гонконге было показано, что модель CHASM численно устойчива и способна правильно классифицировать 78% обрушенных склонов и 68% устойчивых склонов.

CHASM широко использовался практиками и исследователями устойчивости склонов для оценки опасности оползней вдоль дорог, а также в городских и сельских районах, и для предложения соответствующих мер в

Малайзии, Индонезии, восточной части Карибского бассейна, Соединенном Королевстве и Новой Зеландии.

Полное описание численной схемы и основных формул модели CHASM можно найти в работах Андерсона и Ллойда, а также в работах Уилкинсона и др. CHASM представляет поперечное сечение склона как обычную двумерную сетку из столбцов и ячеек с геотехническими и гидрологическими параметрами, определенными для каждого типа почвы. Исходными гидрологическими условиями являются матричная аспирация (отрицательное давление пор) в верхних ячейках каждой колонны и положение уровня грунтовых вод. Последующими условиями динамического воздействия являются дождевые осадки определенной интенсивности и продолжительности, выпадающие на верхние ячейки. Для любого гидрологического отрезка времени (обычно около 10-60 секунд) используется прямая конечно-разностная схема для решения уравнения Ричардса и закона Дарси для инфильтрации дождевых осадков, ненасыщенных и насыщенных потоков подземных вод. Условия влажности в ячейках, напоры давления и ненасыщенная гидравлическая проводимость обновляются на каждом временном шаге с использованием характеристических кривых влажности почвы и процедуры Миллингтона–Квирка. В конце каждого часа симуляции поля напора давления используются для расчета давления поровой воды (положительного и отрицательного) с целью ввода в двумерный метод предельного равновесия (LEM), чтобы рассчитать устойчивость склона. В анализе LEM коэффициент безопасности наклона (F) рассчитывается как отношение дестабилизирующих сил к силам сопротивления для потенциального местоположения поверхности скольжения оползня, так что $F < 1$ указывает на обвал.

В CHASM либо упрощенный круговой метод срезов Бишопа, либо некруглый метод Ямбу реализованы с использованием автоматизированного алгоритма поиска для определения местоположения

поверхности скольжения с минимальным значением F на данный момент.

Результаты исследования и их обсуждение.

1. Анализ точности модели CHASM

В ходе исследования группой ученых во главе с Сюэаной Алмейда (Отдел гражданской инженерии, Университет Бристоля, Бристоль, Великобритания) была проведена оценка точности модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) на различных экспериментальных участках. Результаты показали, что модель CHASM демонстрирует высокую степень точности в прогнозировании устойчивости склонов.

Сравнение результатов моделирования с фактическими данными об оползневых процессах подтвердило способность модели точно классифицировать устойчивые и неустойчивые склоны. В частности, в Гонконге и странах Юго-Восточной Азии модель CHASM успешно предсказала зоны, подверженные оползням, что позволило своевременно принять меры по укреплению инфраструктуры.

2. Ключевые факторы устойчивости почвы

Исследование выявило несколько ключевых факторов, оказывающих значительное влияние на устойчивость почвы:

Гидрологические условия: Изменения в уровне влажности грунта существенно влияют на его механические свойства и устойчивость. Модель CHASM учитывает инфильтрацию, сток и эрозию, что позволяет более точно прогнозировать поведение склонов при различных климатических условиях.

Механические свойства грунта: Плотность, пористость и прочность на сдвиг являются важными параметрами, определяющими устойчивость склонов. Лабораторные испытания и численное моделирование подтвердили значимость этих факторов.

Геологические условия: Наличие трещин, слоев различных типов грунта и подземных вод значительно влияет на стабильность склонов. Георадарные и

сейсмические исследования, интегрированные в модель CHASM, позволили более детально оценить геологические структуры.

Климатические условия: Осадки, температура и влажность играют важную роль в изменении состояния склонов. Учет климатических факторов в модели CHASM обеспечил более точные прогнозы устойчивости.

3. Практическое применение модели CHASM

На основе результатов исследования были разработаны рекомендации по использованию модели CHASM для планирования и реализации укрепляющих сооружений:

Подпорные стенки: Модель CHASM позволила оптимизировать размещение и конструкцию подпорных стенок, что значительно повысило их эффективность в предотвращении оползней.

Дренажные системы: Анализ гидрологических условий с помощью модели помог разработать более эффективные дренажные системы, снижающие уровень грунтовых вод и уменьшающие риск эрозии.

Геосинтетические материалы: Использование модели для оценки механических свойств грунта позволило выбрать наиболее подходящие геосинтетические материалы для укрепления склонов, что повысило их устойчивость.

4. Сравнение с альтернативными методами

Для оценки преимуществ модели CHASM было проведено сопоставление ее результатов с результатами других методов анализа устойчивости склонов. Сравнительный анализ показал следующие преимущества модели CHASM:

Комплексный подход: Модель учитывает множество факторов, влияющих на устойчивость, что обеспечивает более точные прогнозы.

Физически обоснованный метод: Использование численных методов и лабораторных данных делает модель более надежной.

Универсальность: Модель применима в различных географических условиях, что подтверждается успешными испытаниями в разных регионах.

5. Перспективы дальнейшего использования.

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность модели CHASM в оценке устойчивости склонов и прогнозировании оползневых процессов. В будущем планируется дальнейшее развитие и усовершенствование модели, включая внедрение новых алгоритмов и расширение базы данных для более точного анализа в различных условиях. Это позволит использовать модель для более широкого спектра приложений и повысит ее точность и надежность.

Исследование прикладного применения модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) продемонстрировало ее высокую эффективность в оценке характеристик устойчивости почвы. Модель CHASM предоставляет инженерам и исследователям мощный инструмент для точного прогнозирования оползневых процессов и планирования укрепляющих мероприятий. Внедрение этой модели способствует повышению безопасности инфраструктуры и снижению рисков, связанных с оползнями, в различных географических условиях.

Заключение. Исследование, посвящённое оценке прикладного применения модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM), представляет собой комплексный подход к анализу и прогнозированию устойчивости склонов. Основные аспекты исследования включают:

1. Анализ точности и надёжности модели CHASM:

Модель CHASM продемонстрировала высокую степень точности в прогнозировании устойчивости склонов, особенно в различных географических условиях.

Сравнение результатов моделирования с фактическими данными подтвердило

способность модели точно классифицировать устойчивые и неустойчивые склоны.

2. Ключевые факторы устойчивости почвы:

Выявлены основные факторы, влияющие на устойчивость почвы: гидрологические условия, механические свойства грунта, геологические условия и климатические условия. Эти факторы играют критическую роль в изменении состояния склонов и их учёт в модели CHASM позволяет более точно прогнозировать поведение склонов.

3. Практическое применение модели CHASM:

Модель CHASM использовалась для разработки рекомендаций по планированию и реализации укрепляющих сооружений, таких как подпорные стенки, дренажные системы и геосинтетические материалы. Оптимизация этих сооружений на основе данных, полученных с помощью модели, значительно повысила их эффективность в предотвращении оползней.

4. Сравнение с альтернативными методами:

Сравнительный анализ показал преимущества модели CHASM, такие как комплексный подход, физически обоснованный метод и универсальность применения в различных географических условиях.

5. Перспективы дальнейшего использования:

Планируется дальнейшее развитие и усовершенствование модели CHASM, включая внедрение новых алгоритмов и расширение базы данных для более точного анализа.

Исследование прикладного применения модели Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) подтверждает её высокую эффективность в оценке характеристик устойчивости почвы и прогнозировании оползневых процессов. Модель CHASM предоставляет инженерам и исследователям мощный инструмент для точного анализа и планирования укрепляющих мероприятий, способствуя

повышению безопасности инфраструктуры и снижению рисков, связанных с оползнями, в различных географических условиях.

Модель Комбинированной Гидрологии и Устойчивости склона (CHASM) зарекомендовала себя как эффективный инструмент для оценки устойчивости склонов и диагностики рисков, связанных с оползнями. Исследования показали ее высокую точность в классификации склонов и надежность в различных географических условиях. Внедрение CHASM в практику позволило значительно улучшить подходы к управлению рисками оползней, обеспечивая возможность комплексного анализа, который учитывает

как гидрологические, так и геотехнические факторы.

В будущем дальнейшие исследования и применение модели могут привести к совершенствованию методов оценки устойчивости склонов, что непосредственно скажется на безопасности населенных пунктов и инфраструктуры. Разработка усовершенствованных алгоритмов и интеграция с новыми технологическими решениями обеспечат CHASM актуальность и эффективность в условиях меняющегося климата и растущего градостроительства, способствуя более эффективному смягчению последствий оползней

Литература:

1. Almeida, S., Holcombe, E. A., Pianosi, F., and Wagener, T. Dealing with deep uncertainties in landslide modelling for disaster risk reduction under climate change // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 225–241, 2017. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-225-2017> (дата обращения: 02.12.2024).
2. Arnone, E., Dialynas, Y. G., Noto, L. V., and Bras, R. L.: Accounting for soils parameter uncertainty in a physically based and distributed approach for rainfall-triggered landslides // Hydrol. Process., 30, 927–944, 2016. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10609> (дата обращения: 02.12.2024).
3. Фоменко, И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Фоменко Игорь Константинович. – Москва, 2014. – 40 с. – EDN ZPEWHV.
4. Бобрович А.С. Определения вероятности образования оползня с учетом анизотропной модели грунта // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 7. - С. 74-75.
5. Муравьева Е.В., Горбунова О.А. Опасные природные процессы: Учебно-методическое пособие // Е.В. Муравьева, О.А. Горбунова; [автор. ред.], Казань: КНИТУ-КАИ, 2020. - 150 с.
6. ГОСТ 22.0.03-97 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения (аутентичен ГОСТ Р 22.0.03-95) (Источник: ИСС "ТЕХЭКСПЕРТ")
7. МЧС России. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий // официальный сайт, Москва. URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения: 04.12.2024).
8. Ежов, В. С. Строение и классификация оползней / В. С. Ежов, В. С. Хорошилов // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022. - Т. 6. - с. 54-61. DOI 10.33764/2618-981X-2022-6-54-61.
9. Петров, Н. Ф. Теоретические основы классификации оползней / Н. Ф. Петров // Вестник Чувашского университета. – 2005. - № 3. - С. 267-284.

Сведения об авторах:

Кильмаматова К.Н. (г. Казань, Россия), ассистент кафедры промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, e-mail: KNKilmamatova@kai.ru.

Муравьева Е.В. (г. Казань, Россия), доктор педагогических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.