

ISSN 1997-8669 (Print)
ISSN 2587-8220 (Online)

Том XVI | 1/2022
Vol. XVI

ГеоРиск

GeoRisk World



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Саморегулируемая организация



Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве» —
Общероссийское отраслевое
объединение работодателей

Опыт и задачи физического моделирования волн цунами

ГУСАРОВ Р.Н., КАНТАРЖИ И.Г.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

8

Экспериментальное определение нагрузок на плавучий объект от воздействия волн цунами

БЕЛЯЕВ Н.Д., СЕМЕНОВ К.К.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЛЕБЕДЕВ В.В., ЩЕМЕЛИНИН Д.И.

АО «31 Государственный проектный институт специального строительства»

НУДНЕР И.С.

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова

20

Обеспечение устойчивой безопасности морских побережий при воздействии цунами

КЛЯЧКО М.А.

АНО «Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий»

ЗАЙЦЕВ А.И.

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

ТАЛИПОВА Т.Г., ПЕЛИНОВСКИЙ Е.Н.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

32

Оценка оползневой опасности природно-технической системы элементарного уровня на примере оползневого склона в коммуне Чунгчай (Шапа, Вьетнам)

ФОМЕНКО И.К., ГОРОБЦОВ Д.Н.

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ)

ЗЬЮНГ В.Б.

Ханойский горно-геологический университет, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ)

НГУЕН Ч.К.

Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий

ЗЕРКАЛЬ О.В., СИРОТКИНА О.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

56

ПРИЛОЖЕНИЕ

Обзор опасных природных явлений за январь — март 2022 г.

ШАНИНА В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

68

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);

1.6.8. Гляциология и криология Земли (географические науки);

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);

1.6.9. Геофизика (физико-математические науки);

1.6.9. Геофизика (технические науки);

1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);

1.6.17. Океанология (геолого-минералогические науки);

1.6.17. Океанология (физико-математические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (географические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (геолого-минералогические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (технические науки);

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки);

1.6.21. Геоэкология (географические науки).



Experience and tasks of physical modeling of tsunami waves

GUSAROV R.N., KANTARGI I.G.

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering

8

Experimental determination of loads on a floating object under impact of tsunami waves

BELYAEV N.D., SEMENOV K.K.

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

LEBEDEV V.V., SHCHEMLININ D.I.

31 State Design Institute of Special Construction JSC

NUDNER I.S.

Ustinov Baltic State Technical University "VOENMEH"

20

Ensuring the sustainable safety of sea coasts under the influence of a tsunami

KLYACHKO M.A.

Regional Alliance for Disaster Analysis and Reduction ANPO

ZAYTSEV A.I.

Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

TALIPOVA T.G., PELINOVSKY E.N.

Federal Research Center Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences; Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

32

Landslide hazard assessment of natural and technical system at elementary level: a case study of the landslide slope in the Trung Chai Commune (Sa Pa, Vietnam)

FOMENKO I.K., GOROBTSOV D.N.

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

DUONG V.B.

Hanoi University of Mining and Geology; Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

NGUYEN T.K.

Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology

ZERKAL O.V., SIROTKINA O.N.

Lomonosov Moscow State University

56

SUPPLEMENT

Review of natural hazardous events for January – March of 2022

SHANINA V.V.

Lomonosov Moscow State University

68

ОЦЕНКА ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТАРНОГО УРОВНЯ НА ПРИМЕРЕ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА В КОММУНЕ ЧУНГЧАЙ (ШАПА, ВЬЕТНАМ)



Фото Ч.К. Нгуена

ФОМЕНКО И.К.*

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, ifolga@gmail.com
Адрес: ул. Миклухо-Маклая, д. 23, г. Москва, 117997, Россия

ЗЫОНГ В.Б.

Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам, duongvanbinh@humg.edu.vn
Адрес: ул. Вьен, д. 18, г. Ханой, 100000, Вьетнам
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, ifolga@gmail.com

НГУЕН Ч.К.

Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам, kien.mgri@gmail.com
Адрес: ул. Чуаланг, д. 84, г. Ханой, 100000, Вьетнам

ЗЕРКАЛЬ О.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, igzov@mail.ru
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

ГОРОБЦОВ Д.Н.

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия, dngorobtsov@mail.ru

СИРОТКИНА О.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, onsirotkina@gmail.com

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 21.02.2022 / Принята к публикации 25.03.2022 / Дата публикации 30.03.2022

© ООО «Геомаркетинг», 2022

Аннотация: научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды природных и техногенных воздействий, а также оценка на этой основе оползневой опасности с учетом иерархии природно-технических систем (ПТС) дают возможность правильно спланировать мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных ПТС, создать инженерно-геологическую основу для разработки плана хозяйственного освоения территорий. Оценка оползневой опасности на элементарном иерархическом уровне ПТС имеет наибольшее практическое значение, поскольку отличается максимальной степенью точности. Она осуществляется, как правило, комплексом методов и позволяет глубже понять природу и механизм оползневого процесса. Целью статьи является апробация комплексной методики оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня. Рассматриваемая система представляет зону воздействия оползневого склона на участок дороги в коммуне Чунгчай (район Шапа, Вьетнам). Главным фактором начала активизации и развития оползневого процесса на исследуемом участке являются интенсивные ливневые осадки. Оценка устойчивости была выполнена с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов в объемной постановке задачи. Анализ полученных моделей показал, что, несмотря на некоторую неопределенность результатов, можно заметить ряд закономерностей: коэффициент устойчивости F_S и вероятность развития оползневого процесса P_F зависят от величины коэффициента порового давления R_u , при этом его увеличение приводит к снижению F_S и увеличению P_F ; F_S более инертен к изменению R_u в сравнении с P_F ; важнейшим показателем при оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является индекс надежности β ; при моделировании методом конечных элементов были получены более высокие значения F_S , в сравнении со значениями по методу предельного равновесия, при этом разница составила 6,03%.

Ключевые слова: оползневой процесс; уровень иерархии природно-технической системы; расчет устойчивости склона; метод предельного равновесия; метод конечных элементов; вероятностный анализ; индекс надежности; коэффициент порового давления

Благодарности: авторы благодарят Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, а также Национальный научно-технический проект (номер гранта ĐTĐL.CN-81/21) за помощь в проведении данных исследования.

Ссылка для цитирования: Фоменко И.К., Зыонг В.Б., Нгуен Ч.К., Зеркаль О.В., Горобцов Д.Н., Сироткина О.Н., 2022. Оценка оползневой опасности природно-технической системы элементарного уровня на примере оползневого склона в коммуне Чунгчай (Шапа, Вьетнам). ГеоРиск, Том XVI, № 1, с. 56–65, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-1-56-65>.

LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT OF NATURAL AND TECHNICAL SYSTEM AT ELEMENTARY LEVEL: A CASE STUDY OF THE LANDSLIDE SLOPE IN THE TRUNG CHAI COMMUNE (SA PA, VIETNAM)

IGOR K. FOMENKO*

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia; ifolga@gmail.com
Address: Bld. 23, Miklouho-Maclay St., 117997, Moscow, Russia

VAN B. DUONG

Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam; duongvanbinh@humg.edu.vn
Address: Bld. 18, Vien St., 10000, Hanoi, Vietnam
Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

TRUNG K. NGUYEN

Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology; Hanoi, Vietnam; kien.mgri@gmail.com
Address: Bld. 84, Chua Lang St., 10000, Hanoi, Vietnam

OLEG V. ZERKAL

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; igzov@mail.ru
Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

DENIS N. GOROBTSOV

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia; dngorobtsov@mail.ru

OLGA N. SIROTKINA

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; onsirotkina@gmail.com

Original paper

Received 21 February 2022 / Accepted 25 March 2022 / Published 30 March 2022

© Geomarketing LLC, 2022

Abstract: predictions based on scientific knowledge are employed to evaluate the lithosphere's responses to natural and anthropogenic influences. Landslide hazard assessments that consider the hierarchy of natural and technical systems (NTS), allowing for the proper planning of measures to manage the state of regional, local, and elementary NTS, provide an engineering-geological foundation for the design of a plan for the economic development of territories. The assessment of landslide hazard at the elementary hierarchical level of the NTS is of the greatest practical importance, since it is distinguished by the maximum degree of accuracy. It is typically conducted using a range of methods and provides a comprehensive assessment of the nature and mechanism of the landslide process. This study aims to test a comprehensive methodology for assessing the landslide hazard of NTS at the elementary level. The considered elementary NTS represents the affected zone of a landslide slope on a road section in the Trung Chai Commune (Sa Pa District, Vietnam). In the study area, heavy rainfall is the primary factor triggering the occurrence and development of the landslide process. The stability assessment was performed using a set of limit equilibrium and the finite element methods in a three-dimensional formulation of the problem. Despite the uncertainty of the results, the analysis of the obtained models revealed the following regularities: the factor of safety F_S and the probability of the activation of the landslide process P_F depend on the value of the pore water pressure ratio R_u , while an increase in R_u leads to a decrease in the F_S value and an increase in the P_F value; F_S is more inert to changes in R_u than the P_F ; the reliability index β is the critical indicator for determining the landslide hazard at the elementary level of the NTS hierarchy; while modeling slope stability, higher F_S values were achieved by the finite element method than by the limit equilibrium method, and the difference in F_S values between the two models is 6.03%.

Key words: landslide process; natural and technical system hierarchy level; slope stability calculation; limit equilibrium method; finite element method; probabilistic analysis; reliability index; pore water pressure ratio

Acknowledgments: the authors would like to thank the Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology and the National Science and Technology Project (grant No. ĐТĐL.CN-81/21) for their assistance in carrying out this study.

For citation: Fomenko I.K., Duong V.B., Nguyen T.K., Zerkal O.V., Gorobtsov D.N., Sirotkina O.N., 2022. Landslide hazard assessment of natural and technical system at elementary level: a case study of the landslide slope in the Trung Chai Commune (Sa Pa, Vietnam). *GeoRisk World*, Vol. XVI, No. 1, pp. 56–65, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-1-56-65>.

Введение

С конца 1970-х гг. проф. Г.К. Бондариком был введен термин «природно-техническая система» (ПТС), под которой понимается «возникающая в процессе взаимодействия человека и природы целостная система, упорядоченная в пространственно-временном отношении совокупностью взаимодействующих

компонентов, включающих орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно измененные природные тела, а также естественные и искусственные информационно-энергетические поля» [1, 2]. Изучение основных компонентов и вещественно-энергетических связей ПТС служит основой оптимального управления, а также прогноза и контроля состояния природной

среды, что в конечном счете приводит к рациональному экономически и экологически сбалансированному освоению природных ресурсов.

При оценке опасности оползневые системы целесообразно рассматривать как компоненты ПТС. При этом подход к оценке для ПТС различных иерархических уровней также будет различен, т.е. иерархический уровень системы



Рис. 1. Иерархическая структура ПТС для оценки оползневой опасности (на примере района Шапа провинции Лаокай, Вьетнам) (по И.К. Фоменко)

Fig. 1. Hierarchical structure of the natural and technical system for landslide hazard assessment (a case study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam) (by I.K. Fomenko)

определяет методику оценки и прогноза оползневой опасности в ее пределах.

На рис. 1 приведена иерархическая структура ПТС для оценки оползневой опасности района Шапа провинции Лаокай (Вьетнам).

Научно-обоснованный прогноз реакций литосферы на различные виды природных и техногенных воздействий, а также оценка на этой основе оползневой опасности с учетом иерархии ПТС дают возможность правильно спланировать

мероприятия по управлению состоянием региональных, локальных и элементарных систем, создать инженерно-геологическую основу для разработки плана хозяйственного освоения территорий.

Ранее [4–6] были рассмотрены методики оценки оползневой опасности ПТС регионального и локального иерархических уровней.

Целью настоящей статьи является апробация комплексной методики оценки оползневой опасности ПТС элементарного уровня.

Элементарный уровень ПТС представляет систему, область взаимодействия которой не пересекается и не граничит с другими сферами (например, отдельно стоящее здание или сооружение). Оценка оползневой опасности на этом иерархическом уровне из-за своей конкретности имеет наибольшее практическое значение. Она, как правило, осуществляется комплексом методов и позволяет глубже понять природу и механизм оползневого процесса.

Краткое описание объекта исследований

Моделируемый оползневой склон расположен на автодороге № 152 провинциального уровня между пикетами 12+600 и 12+900 км в коммуне Чунгчай (рис. 2), т.е.

элементарная ПТС представляет зону воздействия оползневого склона на участок дороги. Во время обследования в теле оползня были зафиксированы трещины и деформации. Главным фактором начала активизации и развития процесса на исследуемом участке стали интенсивные ливневые осадки. В геологическом отношении изучаемый район сложен грунтами комплекса По Сен нижнепалеозойского возраста (γPZ_{1ps}), которые включают гранодиориты, граниты и гранит-мигматиты достаточно высокой прочности. Однако в процессе выветривания дочетвертичных образований сформировался мощный слой элювиально-делювиальных отложений суглинистого состава с включениями гравия и щебня грунтов основания.

В качестве топографической основы была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 1 м. ЦМР и геологическая информация стали основой при построении объемной инженерно-геологической модели (рис. 3).

Методика исследования

Оценка устойчивости была выполнена с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов в объемной постановке задачи.

В качестве исходных данных использовались результаты инженерно-геоло-

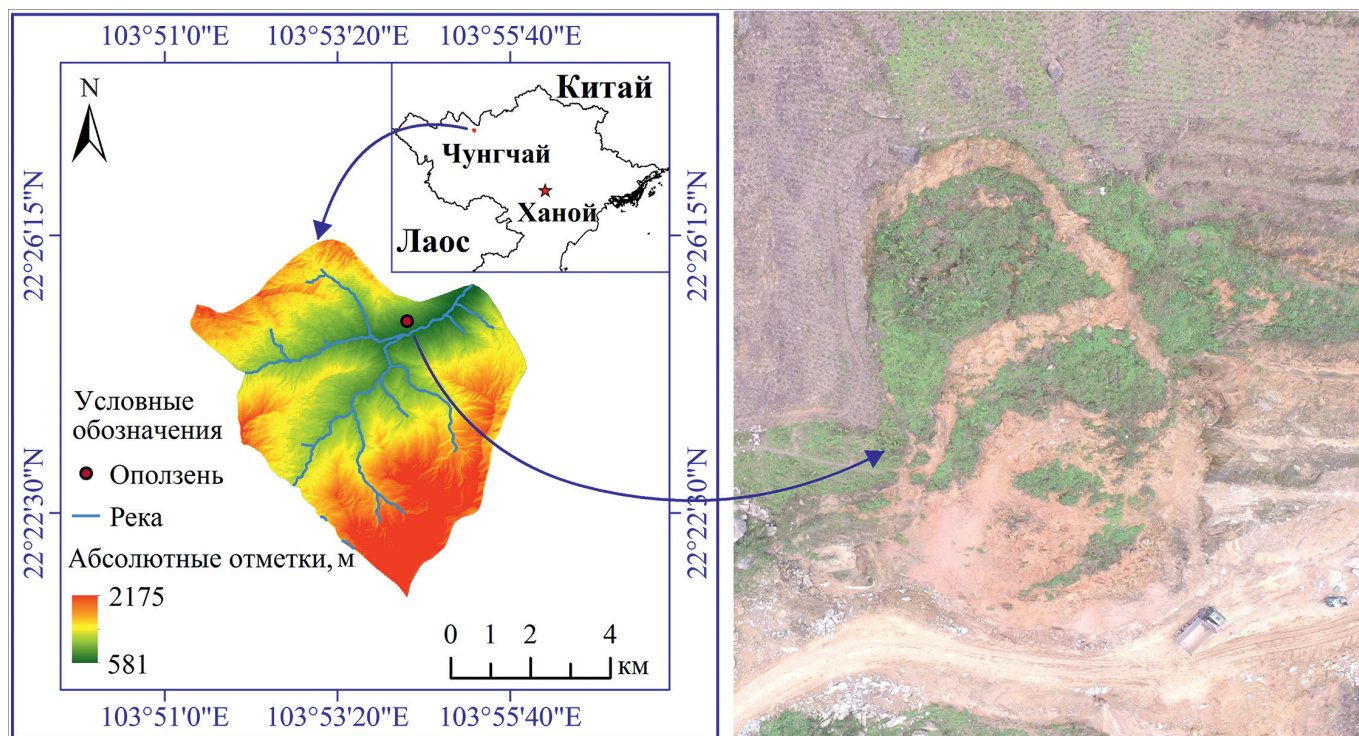


Рис. 2. Расположение исследуемого участка (оползневой склон на автодороге № 152 между пикетами 12+600 и 12+900 км в коммуне Чунгчай, Вьетнам). Фото Ч.К. Нгуена

Fig. 2. Location of the study site (landslide slope on provincial road No. 152 between 12+600 and 12+900 km in Trung Chai Commune). Photo by T.K. Nguyen

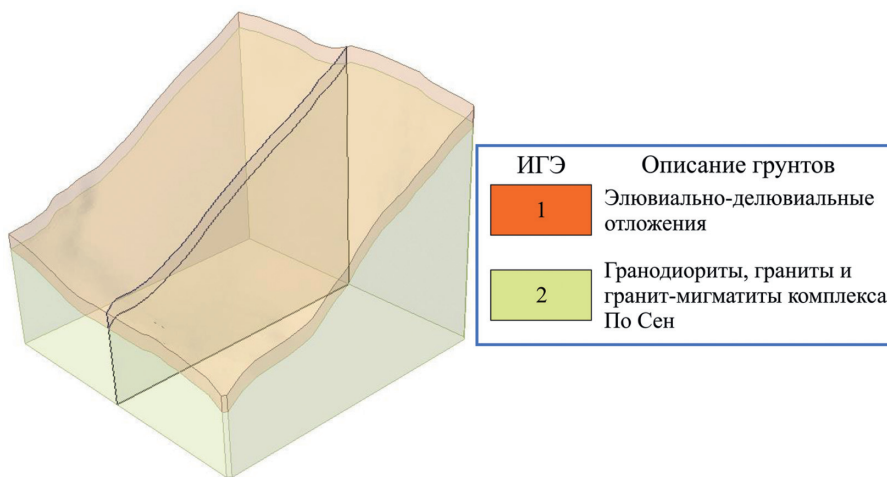


Рис. 3. Объемная инженерно-геологическая модель

Fig. 3. Volumetric engineering-geological model

Таблица 1
Table 1

Физико-механические свойства грунтов элювиально-делювиального генезиса Physical and mechanical properties of eluvial and deluvial soils		
Параметры	Вариант расчета	
	сухой сезон	сезон дождей
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	18,9	19,3
Сцепление грунта c , кПа	22,0	20,0
Угол внутреннего трения ϕ , град.	16,3	15,1

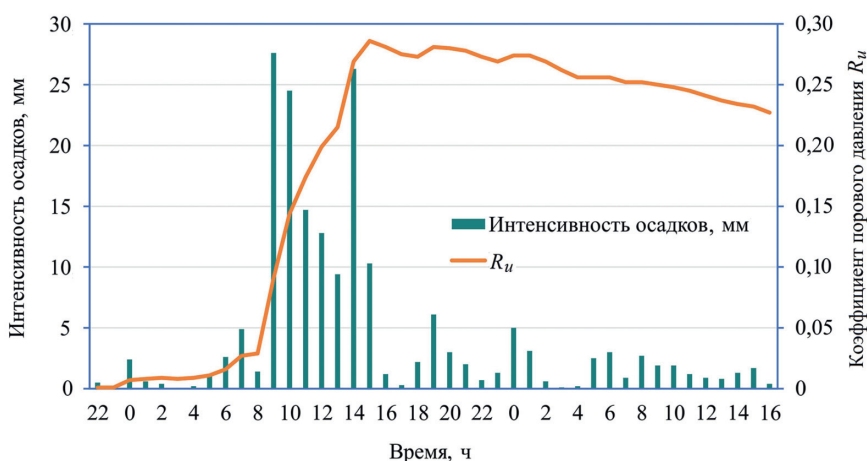


Рис. 4. Связь между интенсивностью и продолжительностью осадков с коэффициентом порового давления

Fig. 4. Relationship between the intensity and duration of rainfall with the pore water pressure ratio

гических изысканий и информация об осадках, полученные Институтом геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий.

В расчетах была принята упругопластическая модель поведения грунтов Кулона — Мора. Эффективные пара-

метры прочности — удельное сцепление и угол внутреннего трения — определялись на основе консолидировано-дренированного (КД) испытания методом одноплоскостного среза по двум вариантам: при естественной влажности (для оценки устойчивости склона в

сухой сезон) и в водонасыщенном состоянии (для оценки устойчивости склона в период ливневых осадков). Результаты испытаний грунтов элювиально-делювиального генезиса приведены в табл. 1.

Из-за отсутствия фактических данных по замерам порового давления в представленной работе его влияние на результаты расчета устойчивости склона учитывалось путем введения коэффициента порового давления R_u , предложенного A.W. Bishop и N.R. Morgenstern в 1960 г. [10]. Эти исследователи определили его следующим образом:

$$R_u = u/\gamma h, \quad (1)$$

где u — поровое давление; γ — удельный вес грунта; h — глубина рассматриваемой точки от дневной поверхности.

При перестановке переменных выражение для определения величины порового давления приобретает следующий вид:

$$u = R_u \gamma h. \quad (2)$$

Использование коэффициента порового давления широко представлено на диаграммах расчета устойчивости склонов, разработанных A.W. Bishop и N.R. Morgenstern [10]. Существенным недостатком данного подхода является допущение о постоянстве R_u по всему поперечному сечению.

Учет изменения порового давления, так же как и при оценке оползневой опасности ПТС локального уровня [5, 16], основывался на анализе интенсивности осадков во времени. В результате для определения R_u были использованы данные об осадках в период сильного ливня, который длился с 22 ч 30 мая по 24 ч 31 мая 2020 г. В 15 ч 31 мая максимальное значение коэффициента порового давления составило 0,286. На рис. 4 приведена взаимосвязь R_u с интенсивностью и продолжительностью осадков, которая была использована при выполнении расчетов.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты 3D-расчета устойчивости склона методом предельного равновесия

Эффективность расчета устойчивости склона методами предельного равновесия (МПП) была показана в [7].

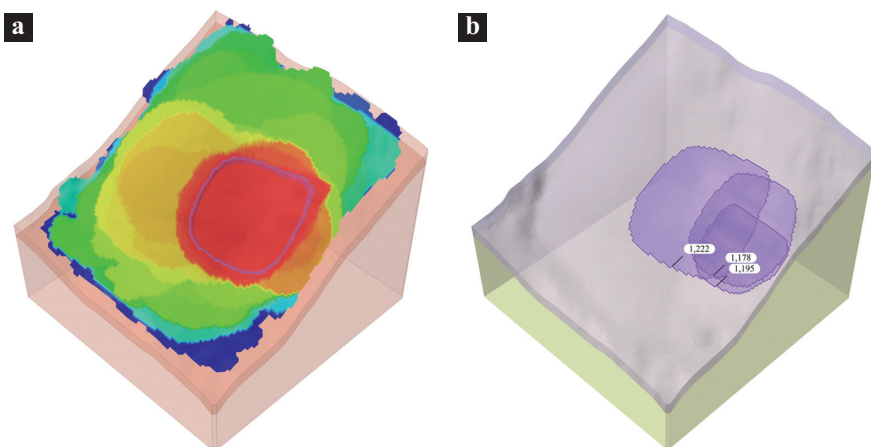


Рис. 5. Результат расчета устойчивости склона в сухой период: а — устойчивость склона; б — положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной PSO-оптимизации

Fig. 5. Result of calculating slope stability in the dry period: a — slope stability; b — position of possible sliding surfaces obtained in the process of multimodal particle swarm optimization

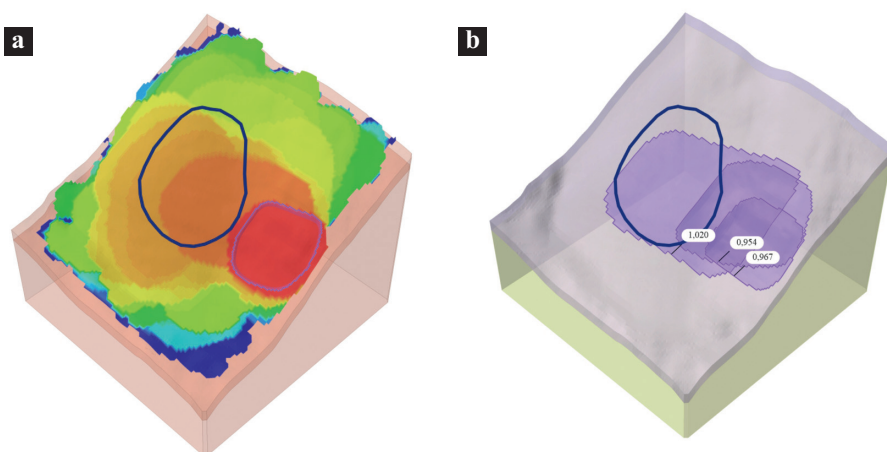


Рис. 6. Результат расчета устойчивости склона в период интенсивных ливневых осадков на момент времени 10 ч 31 мая 2020 г.: а — устойчивость склона; б — положение возможных поверхностей скольжения, полученных в процессе мультимодальной PSO-оптимизации. Обозначения: синий контур — фактическое положение блока смещения

Fig. 6. Result of calculating slope stability during intense heavy rainfall at 10:00, 31 May 2020: a — slope stability; b — position of possible sliding surfaces obtained in the process of multimodal particle swarm optimization. Designations: blue outline — the actual position of the offset block

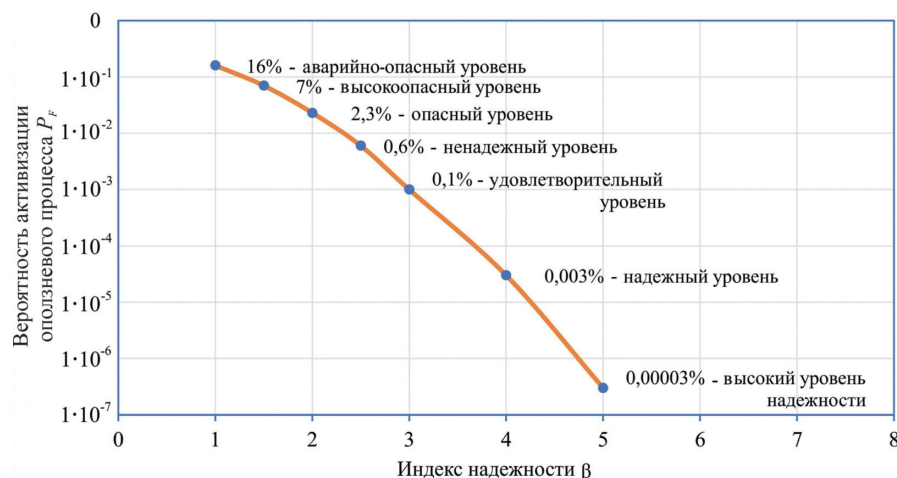


Рис. 7. Оценка уровня надежности (по рекомендациям [12])

Fig. 7. Assessment of the reliability level (according to recommendations [12])

Расчеты выполнялись простым методом N.O.C. Janbu [13] с использованием мультимодальной оптимизации поверхности скольжения, позволяющей находить несколько локальных минимумов, на основе метода поиска роя частиц (particle swarm optimization — PSO) [11, 14] при детерминистических расчетах и унимодальной оптимизации на основе метода поиска кукушки¹ [17] при вероятностном анализе.

Итоговая геотехническая 3D-модель с результатами оценки устойчивости в сухой период приведена на рис. 5, в период интенсивных ливневых осадков — на рис. 6.

Анализ результатов детерминированных расчетов показал, что в сухой период склон является устойчивым, коэффициент устойчивости склона F_S составляет 1,258 и 1,178 при вероятностном и детерминистическом анализе соответственно.

В отличие от детерминистического подхода, при вероятностном анализе исходными параметрами являются не единичные значения свойств грунтов, а их функции распределения. Результат решения в этом случае — также вероятностная функция распределения F_S , на основе которой можно определить вероятность развития оползневой процесса P_F по следующей формуле:

$$P_F = \frac{\text{Количество результатов расчетов с } F_S < 1}{\text{Общее количество расчетов}} \quad (3)$$

Вероятность активизации оползневой процесса в данном исследовании составила 3,2%.

В процессе интенсивных ливневых осадков за счет инфильтрации воды в грунт будет происходить увеличение порового давления, что, как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости склона. Выполненный расчет показал, что при увеличении R_u от 0 до 0,286 (на момент времени 15 ч 31 мая 2020 г.) F_S уменьшается с 1,258 до 0,901 при вероятностном анализе и с 1,178 до 0,895 при детерминистическом расчете. Вероятность активизации оползневой процесса при этом увеличивается с 3,2 до 80,6%. Кроме того, результаты анализа показали, что склон теряет устойчивость около 10 ч 31 мая (см. рис. 6).

Важным показателем при оценке оползневой опасности является индекс надежности β , который служит мерой

¹ Метод поиска кукушки (от англ. cuckoo search) — один из алгоритмов роевого интеллекта, представляет собой оптимизационный алгоритм, разработанный Янг Синьшэ (Xin-She Yang) и Суашем Дебом (Suash Deb) в 2009 г.

нормализации F_S на стандартное отклонение [3, 15]:

$$\beta = (F_S - 1,0) / \sigma_{F_S}, \quad (4)$$

где σ_{F_S} — среднеквадратическое отклонение F_S .

Данный показатель позволяет подойти к оценке устойчивости склонов с позиций теории надежности.

Одной из основных проблем при проведении анализа надежности является определение приемлемого уровня безопасности. В настоящее время не существует единого мнения по этому вопросу. Например, согласно [8], при оценке устойчивости бортов карьеров приемлемый уровень надежности достигается при $\beta > 3,0$. В соответствии с рекомендациям Корпуса инженеров Армии США (рис. 7) [12] удовлетворительный уровень надежности достигается также при $\beta > 3,0$. Поэтому, несмотря на тот факт, что моделируемый склон в сухой период является устойчивым, его индекс надежности составляет 1,85, а уровень надежности ПТС к развитию оползневой процесса следует оценивать как опасный.

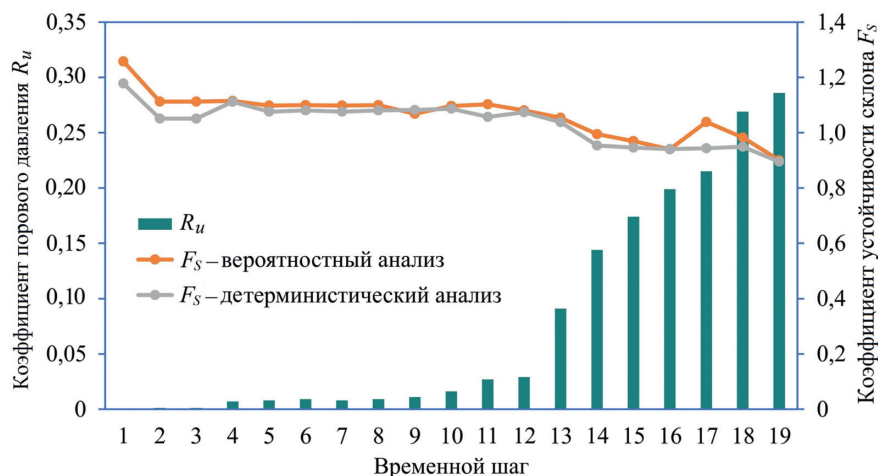


Рис. 8. Связь между F_S и R_u в зависимости от времени, прошедшего с начала ливневого дождя

Fig. 8. Relationship between F_S and R_u as a function of time since the beginning of heavy rain

Полученные в процессе применения МПР результаты расчетов F_S исследуемого склона в зависимости от изменения R_u в период ливневых осадков приведены на рис. 8. Чем выше R_u в слое грунта, тем ниже значение F_S .

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2.

Верификация модели

Верификация модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с фактическими данными по обрушению склона (см. рис. 6).

Ранее моделирование устойчивости склона и оценка риска на основе анализа деформаций были отдельными

Таблица 2
Table 2

Результаты расчета устойчивости склона МПР Calculated results of slope stability using limit equilibrium method

Время, ч	R_u	Программный комплекс Slide3			
		Вероятностный анализ			Детерминистический анализ
		F_S	P_{FS} %	β	F_S
–	0	1,258	3,2	1,850	1,178
22	0,001	1,113	20,1	0,848	1,051
23	0,001	1,113	20,1	0,848	1,051
0	0,007	1,115	19,6	0,870	1,112
1	0,008	1,098	23,0	0,754	1,076
2	0,009	1,100	22,1	0,770	1,081
3	0,008	1,098	23,0	0,754	1,076
4	0,009	1,100	22,1	0,770	1,081
5	0,011	1,069	28,6	0,555	1,082
6	0,016	1,097	22,9	0,749	1,087
7	0,027	1,103	22,0	0,784	1,057
8	0,029	1,081	25,6	0,643	1,074
9	0,091	1,054	32,7	0,431	1,038
10	0,144	0,995	50,4	–0,014	0,954
11	0,174	0,970	58,6	–0,225	0,946
12	0,199	0,940	68,9	–0,504	0,941
13	0,215	1,039	37,9	0,309	0,944
14	0,269	0,983	55,6	–0,130	0,949
15	0,286	0,901	80,6	–0,891	0,895

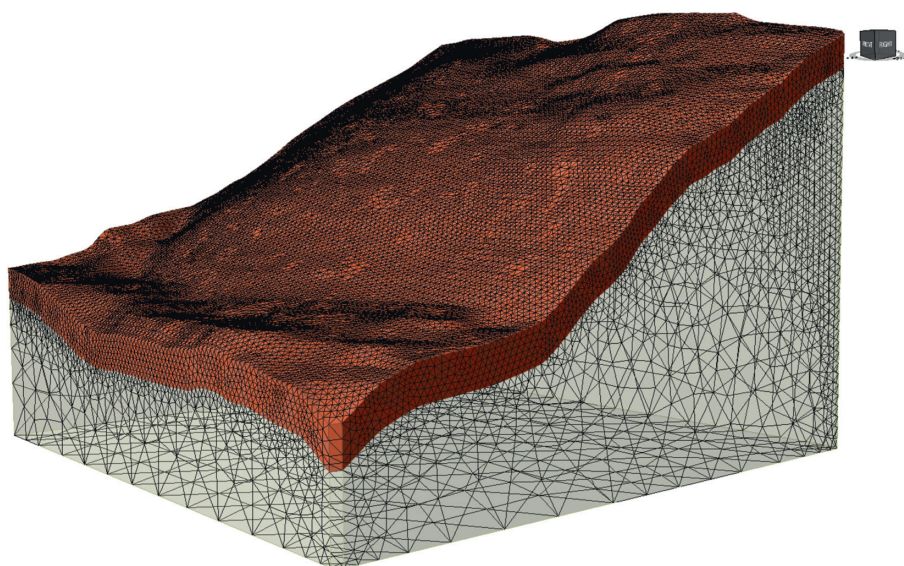


Рис. 9. Расчетная конечноэлементная модель, включающая 633 472 элемента

Fig. 9. Finite element model with 633 472 elements

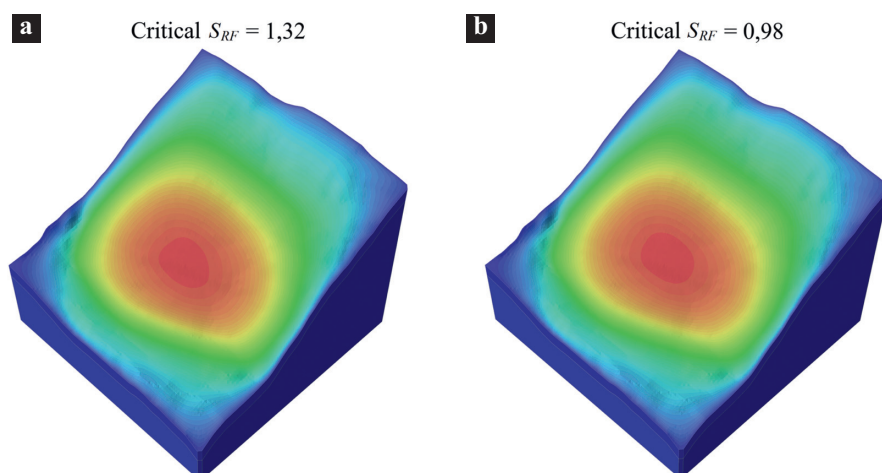


Рис. 10. Результаты моделирования устойчивости склона с использованием программного комплекса RS3: а — в сухой период; б — в период интенсивных ливневых осадков на момент времени 14 ч 31 мая 2020 г.

Fig. 10. Results of slope stability modeling using RS3 software: a — during the dry period; b — during the period of intense heavy rainfall at 14:00, 31 May 2020

задачами. Их совместное решение стало возможным относительно недавно с внедрением в расчеты устойчивости склонов 3D-методов [9]. Однако возникающие при этом проблемы не решены полностью, что связано в первую очередь с рядом неопределенностей при расчете устойчивости склонов, например, с неточностями в определении прочностных параметров грунтов, слагающих склон, выбором методов решения задачи, алгоритмами оптимизации поверхности скольжения (при использовании методов предельного равновесия), неточ-

ностями при построении геометрической модели и т.д.

В данном исследовании, несмотря на незначительные расхождения результата расчета с фактическими данными по смещению оползневого тела, уровень их сходимости может быть оценен как удовлетворительный (см. рис. 6).

Результаты 3D-расчета устойчивости склона методом конечных элементов

Моделирование методом конечных элементов (МКЭ) так же, как и расчеты МПР, было выполнено для

оценки изменения устойчивости склона, связанной с увеличением коэффициента порового давления, вызванного интенсивными ливневыми осадками, с использованием тех же прочностных показателей грунтов. Аналогично расчетам МПР моделирование осуществлялось в трех- и двухмерной постановке задачи по следующим вариантам:

- в сухой период ($R_u = 0$);
- в период интенсивных ливневых осадков на момент времени 14 ч 31 мая 2020 г. ($R_u = 0,269$).

Расчеты были выполнены с использованием градуированной тетраэдрической сетки, включающей 633 472 элемента. Расчетная конечноэлементная модель представлена на рис. 9.

Итоговая геотехническая 3D-модель с результатами оценки устойчивости в сухой период приведена на рис. 10, а, в период интенсивных ливневых осадков — на рис. 10, б.

Анализ полученных результатов показал, что в сухой период склон является устойчивым с критическим коэффициентом снижения прочности $S_{RF} = 1,32$. В процессе интенсивных ливневых осадков за счет инфильтрации воды в грунт будет происходить увеличение порового давления, что, как следствие, приведет к снижению коэффициента устойчивости склона. Выполненный расчет показал, что при росте R_u от 0 до 0,286 (на момент времени 15 ч 31 мая 2020 г.) S_{RF} уменьшается с 1,32 до 0,96. Кроме того, результаты анализа позволили установить, что склон теряет устойчивость около 14 ч 31 мая ($S_{RF} = 0,98$).

На рис. 11 показано изменение величины S_{RF} , определенной методом снижения прочности на сдвиг, в зависимости от изменения коэффициента порового давления во времени. Анализ рис. 11 показывает, что наибольшее уменьшение S_{RF} наблюдается в первые 2 ч от начала ливня, далее коэффициент устойчивости в течение последующих 10 ч снижается с очень незначительным градиентом, а затем скорость его падения снова несколько возрастает. В целом полученные результаты хорошо согласуются с результатами МПР, хотя значения S_{RF} в МКЭ в 1,06 раза превышают величину F_S , полученную с помощью программного комплекса Slide3. Положение блока обрушения также согласуется с расчетами МПР.

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 3.

Выводы

Оценка оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС из-за своей большей степени конкретности по сравнению с другими уровнями имеет наибольшее практическое значение. Она, как правило, осуществляется комплексом методов и позволяет глубже понять природу и механизм оползневой опасности.

В представленном исследовании расчеты устойчивости были выполнены с использованием комплекса методов предельного равновесия и конечных элементов.

Анализ полученных моделей показал, что несмотря на некоторую неопределенность результатов, можно заметить ряд закономерностей:

- коэффициент устойчивости и вероятность развития оползневой опасности зависят от величины коэффициента порового давления, при этом увеличение R_u приводит к снижению F_S и увеличению P_F ;

- коэффициент устойчивости более инертен к изменению коэффициента порового давления в сравнении с вероятностью развития оползневой опасности;

- при моделировании МКЭ были получены, как правило, более высокие значения S_{RF} в сравнении со значениями F_S по МПР (простой метод Ямбу);

- при объемном моделировании разница в значениях коэффициента устойчивости, полученная МПР (простой метод Ямбу) и МКЭ, в среднем составила 6,03%, а между значениями F_S — от -1,86 до 9,41%.

Вероятностные расчеты устойчивости ПТС элементарного уровня позволяют учитывать факторы неопределенности, тем самым повышая достоверность результатов моделирования. Важнейшим показателем при оценке оползневой опасности на элементарном уровне иерархии ПТС является индекс надежности β . Выполненная оценка устойчивости показала: несмотря на тот факт, что моделируемый склон в сухой период устойчив, индекс

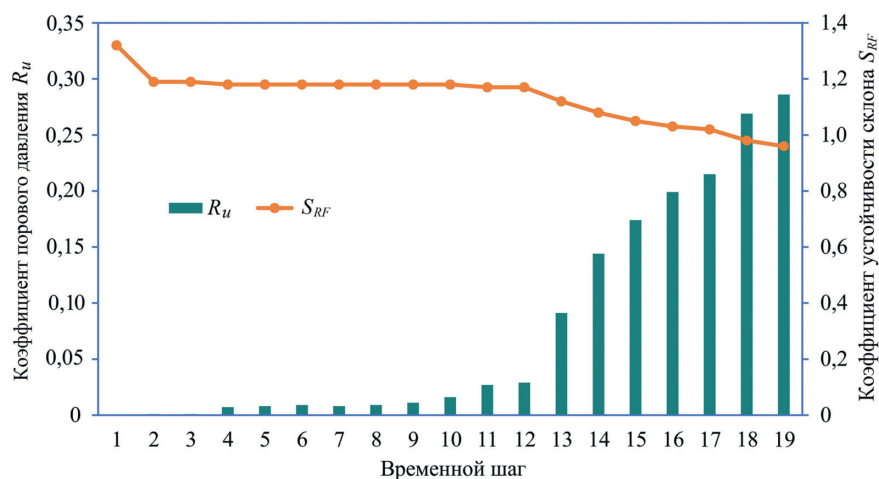


Рис. 11. Связь между S_{RF} и R_u в зависимости от времени, прошедшего с начала ливневого дождя

Fig. 11. Relationship between S_{RF} and R_u depending on the time from the beginning of the heavy rain

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета устойчивости склона МКЭ Calculated results of slope stability using finite element method

Время, ч	R_u	S_{RF}
	0	1,32
22	0,001	1,19
23	0,001	1,19
0	0,007	1,18
1	0,008	1,18
2	0,009	1,18
3	0,008	1,18
4	0,009	1,18
5	0,011	1,18
6	0,016	1,18
7	0,027	1,17
8	0,029	1,17
9	0,091	1,12
10	0,144	1,08
11	0,174	1,05
12	0,199	1,03
13	0,215	1,02
14	0,269	0,98
15	0,286	0,96

надежности данной ПТС к развитию оползневой опасности составляет 1,85,

и, таким образом, уровень ее надежности следует оценивать как опасный. ☹️

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарик Г.К., 1981. Общая теория инженерной (физической) геологии. Недра, Москва.
2. Бондарик Г.К., Ярг Л.А., 2015. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии. КДУ, Москва.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К., 2016. Влияние различных факторов на результаты вероятностного анализа активизации оползневых процессов. Инженерная геология, № 1, с. 16–21.

4. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Ву Х.Д., Нгуен Т.Х., Сироткина О.Н., 2021. Региональная оценка оползневой опасности модифицированным методом анализа иерархий в геоинформационной системе (на примере района Шапа провинции Лаокай Вьетнама). *Инженерная геология*, Том XVI, № 2, с. 6–20, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>.
5. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Нгуен З.Ф., Нгуен Ч.К., Ву Х.Д., Зеркаль О.В., 2022. Локальная оценка оползневой опасности с использованием Scoops3D на примере территории коммуны Чунгчай (Шапа, Вьетнам). *Инженерная геология*, Том XVII, № 1, с. 34–47, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-34-47>.
6. Зыонг В.Б., Фоменко И.К., Нгуен Ч.К., Ви Т.Х.Л., Зеркаль О.В., Ву Х.Д., 2022. Применение статистических методов на основе ГИС для оценки потенциального развития оползней в районе Шапа, Вьетнам. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Том 333, № 4, с. 126–140, <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473>.
7. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., 2011. Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трехмерной постановке. *Геотехника*, № 5, с. 38–43.
8. Abdulai M., Sharifzadeh M., 2021. Probability methods for stability design of open pit rock slopes: an overview. *Geosciences*, Vol. 11, Issue 8, ID 319, <https://doi.org/10.3390/geosciences11080319>.
9. Bar N., Arrieta M., Espino A., Diaz C., Mosquea L.A., Mojica B., McQuillan A., Baldeon G., Falorni G., 2021. Back-analysis of ductile slope failure mechanisms and validation with aerial photogrammetry, In SAR and GbRAR to proactively manage economic risks to protect the mine plan. In R.E. Hammah, T.E. Yacoub, A. McQuillan, J. Curran (eds), *The evolution of Geotech — 25 years of innovation*. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 512–526, <https://doi.org/10.1201/9781003188339-25>.
10. Bishop A.W., Morgenstern N., 1960. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, Vol. 10, Issue 4, pp. 129–153, <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.4.129>.
11. Eberhart R., Kennedy J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6th International Symposium on micro machine and human science*, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39–43, <https://ieeexplore.ieee.org/document/494215>.
12. *Engineering and design: introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*, 1997. Technical Letter No. 1110-2-547. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
13. Janbu N., 1954. Application of composite slip surfaces for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on stability of earth slopes*, Stockholm, Sweden, 1954, Vol. 3, pp. 43–49.
14. Kennedy J., Eberhart R., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of the International Conference on neural networks*, Perth, Australia, 1995, Vol. 4, pp. 1942–1948, <https://ieeexplore.ieee.org/document/488968>.
15. Krahn J., 2004. *Stability modeling with SLOPE/W. An engineering methodology*, 1st edition. GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Canada.
16. Liao Z., Hong Y., Wang J., Fukuoka H., Sassa K., Karnawati D., Fathani T., 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, Vol. 7, Issue 3, pp. 317–324, <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0219-7>.
17. Yang X.-S., Deb S., 2009. Cuckoo search via Lévy flights. *Proceedings of the World Congress on nature and biologically inspired computing*, Coimbatore, India, 2009, pp. 210–214, <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>.

REFERENCES

1. Bondarik G.K., 1981. *General theory of engineering (physical) geology*. Nedra, Moscow. (in Russian)
2. Bondarik G K., Yarg L.A., 2015. *Engineering geology. Questions of theory and practice. Philosophical and methodological bases of geology*. KDU, Moscow. (in Russian)
3. Zerkal O.V., Fomenko I.K., 2016. Influence of various factors on the results of probabilistic analysis of landslide activation. *Inzhenernaya Geologiya*, No. 1, pp. 16–21. (in Russian)
4. Duong V.B., Fomenko I.K., Vu H.D., Nguyen T.H., Sirotkina O.N., 2021. Regional assessment of landslide hazard using modified analytic hierarchies process method in geoinformation system (a study of the Sa Pa District, Lao Cai Province, Vietnam). *Engineering Geology World*, Vol. XVI, No. 2, pp. 6–20, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-2-6-20>. (in Russian)
5. Duong V.B., Fomenko I.K., Nguyen H.P., Nguyen T.K., Vu H.D., Zerkal O.V., 2022. Application of Scoops3D for local assessment of landslide hazard on the example of the Trung Chai Commune territory (Sa Pa, Vietnam). *Engineering Geology World*, Vol. XVII, No. 1, pp. 34–47, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2022-17-1-34-47>. (in Russian)
6. Van B.D., Fomenko I.K., Nguyen T.K., Vi T.H.L., Zerkal O.V., Vu H.D., 2022. Application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide potential assessment in Sapa, Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, Vol. 333, No. 4, pp. 126–140, <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3473>. (in Russian)
7. Fomenko I.K., Zerkal O.V., 2011. Advantages of three-dimensional methods of assessing slope stability. *Geotechnics*, No. 5, pp. 38–43. (in Russian)
8. Abdulai M., Sharifzadeh M., 2021. Probability methods for stability design of open pit rock slopes: an overview. *Geosciences*, Vol. 11, Issue 8, ID 319, <https://doi.org/10.3390/geosciences11080319>.

9. Bar N., Arrieta M., Espino A., Diaz C., Mosquea L.A., Mojica B., McQuillan A., Baldeon G., Falorni G., 2021. Back-analysis of ductile slope failure mechanisms and validation with aerial photogrammetry, In SAR and GbRAR to proactively manage economic risks to protect the mine plan. In R.E. Hammah, T.E. Yacoub, A. McQuillan, J. Curran (eds), *The evolution of Geotech — 25 years of innovation*. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 512–526, <https://doi.org/10.1201/9781003188339-25>.
10. Bishop A.W., Morgenstern N., 1960. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, Vol. 10, Issue 4, pp. 129–153, <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.4.129>.
11. Eberhart R., Kennedy J., 1995. A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the 6th International Symposium on micro machine and human science*, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39–43, <https://ieeexplore.ieee.org/document/494215>.
12. *Engineering and design: introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*, 1997. Technical Letter No. 1110-2-547. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
13. Janbu N., 1954. Application of composite slip surfaces for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on stability of earth slopes*, Stockholm, Sweden, 1954, Vol. 3, pp. 43–49.
14. Kennedy J., Eberhart R., 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of the International Conference on neural networks*, Perth, Australia, 1995, Vol. 4, pp. 1942–1948, <https://ieeexplore.ieee.org/document/488968>.
15. Krahn J., 2004. *Stability modeling with SLOPE/W. An engineering methodology*, 1st edition. GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Canada.
16. Liao Z., Hong Y., Wang J., Fukuoka H., Sassa K., Karnawati D., Fathani T., 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, Vol. 7, Issue 3, pp. 317–324, <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0219-7>.
17. Yang X.-S., Deb S., 2009. Cuckoo search via Lévy flights. *Proceedings of the World Congress on nature and biologically inspired computing*, Coimbatore, India, 2009, pp. 210–214, <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>.

Информация об авторах

ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

Профессор кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), д.г.-м.н., г. Москва, Россия

ЗЬЮНГ ВАН БИНЬ

Преподаватель кафедры инженерной геологии факультета наук о Земле и геологической инженерии Ханойского горно-геологического университета, г. Ханой, Вьетнам; аспирант кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Россия

НГУЕН ЧУНГ КИЕН

Старший научный сотрудник отдела гидрогеологии и инженерной геологии Института геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам

ЗЕРКАЛЬ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

И.о. заведующего лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

ГОРОБЦОВ ДЕНИС НИКОЛАЕВИЧ

Заведующий кафедрой инженерной геологии гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), к.г.-м.н., г. Москва, Россия

СИРОТКИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

Старший научный сотрудник кафедры динамической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

Information about the authors

IGOR K. FOMENKO

DSc (Geology and Mineralogy); Professor in the Department of Engineering Geology, Hydrogeological Faculty, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

VAN B. DUONG

Lecturer of the Department of Engineering Geology, Faculty of Geosciences and Geology Engineering, Hanoi University of Mining and Geology; Hanoi, Vietnam; Postgraduate Student of the Department of Engineering Geology, Hydrogeological Faculty, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

TRUNG K. NGUYEN

Senior Research Scientist of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology; Hanoi, Vietnam

OLEG V. ZERKAL

PhD (Geology and Mineralogy); Acting Head of the Laboratory for Engineering Geodynamics and the Substantiation of Engineering Protection of Territories and Leading Research Scientist of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

DENIS N. GOROBTSOV

PhD (Geology and Mineralogy); Head of the Department of Engineering Geology, Hydrogeological Faculty, Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI); Moscow, Russia

OLGA N. SIROTKINA

PhD (Geology and Mineralogy); Senior Research Scientist of the Department of Dynamic Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia