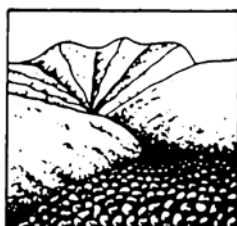


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



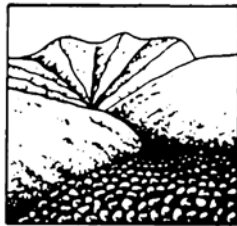
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ. ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Численное моделирование вязных селевых потоков и оползней на горных склонах

Г.С. Хакимзянов^{1,2}, О.И. Гусев^{1,2}, В.С. Скиба^{1,2}, А.В. Бакулина^{1,2}, А.В. Кладов²,
С.А. Церешко², Л. Чжао²

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия, khak@ict.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация. Содержание настоящего доклада связано с разработкой вычислительного инструментария, основанного на упрощенной и одновременно универсальной математической модели, описывающей как сход оползня с криволинейного горного склона, так и движение вязного селя по криволинейному наклонному водотоку, а также с разработкой и исследованием численных алгоритмов решения задачи о каскадном стихийном бедствии, связанном с образованием опасных волн цунами при входе берегового оползня в водоем. Будут приведены результаты верификации численных алгоритмов и валидации используемых математических моделей на наборе тестовых задач и данных лабораторных экспериментов, результаты численного моделирования разрушительного цунами, возникшего при входе берегового оползня в водохранилище Бурейской ГЭС, результаты расчетов различных сценариев прохождения вязного селя по наклонному криволинейному руслу и выноса селевого материала к подножью склона.

Ключевые слова: горный склон, вязный селя, конус выноса, оползень, цифровая модель рельефа, численный алгоритм

Ссылка для цитирования: Хакимзянов Г.С., Гусев О.И., Скиба В.С., Бакулина А.В., Кладов А.В., Церешко С.А., Чжао Л. Численное моделирование вязных селевых потоков и оползней на горных склонах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 205–216.

Numerical modeling of viscous debris flows and landslides on mountain slopes

G.S. Khakimzyanov^{1,2}, O.I. Gusev^{1,2}, V.S. Skiba^{1,2}, A.V. Bakulina^{1,2}, A.V. KladoV²,
S.A. Tsereshko², L. Zhao²

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russia, khak@ict.nsc.ru

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Abstract. This presentation is devoted to the development of computational tools based on a simplified but universal mathematical model that describes both the movement of a landslide down a mountain slope and the flow of a viscous debris flow along an inclined watercourse. It also discusses the development and testing of numerical algorithms to solve the complex problem of cascading natural disasters associated with the formation of tsunami waves when a landslide enters a reservoir. The verification of the numerical algorithms and the validation of the mathematical models will be demonstrated through a series of test problems and laboratory experiments. The results of the numerical simulations of a catastrophic tsunami triggered by the landslide entering the reservoir of the Bureyskaya Hydroelectric Power Plant will be presented. Additionally, the presentation includes the results of calculations for various scenarios involving the viscous debris flow moving along a curved channel and its deposition at the base of a slope.



Key words: *mountain slope, viscous debris flow, fan, landslide, digital relief, numerical algorithm*

Cite of this article: Khakimzyanov G.S., Gusev O.I., Skiba V.S., Bakulina A.V., Kladov A.V., Tsereshko S.A., Zhao L. Numerical modeling of viscous debris flows and landslides on mountain slopes. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 205–216.

Введение

Сели и оползни являются одними из самых опасных и распространенных стихийных бедствий [Михайлов и Черноморец, 2011; Ward et al., 2011]. Исследование сценариев возникновения и развития селевых потоков и оползней является чрезвычайно сложной задачей и поэтому она может быть решена только в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего усилия специалистов многих научных дисциплин и различных методик исследования – исторических, натурных, лабораторных и численного моделирования. В частности, оценка опасности включает анализ геологических полевых данных [Коковкин, 2020; Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019; Gusiakov et al., 2021; Huang et al., 2016; Higman et al., 2018; Sepulveda et al., 2009] в сочетании с численным моделированием [Fructus et al., 2007; Paris et al., 2019; Xu et al., 2021] или лабораторными экспериментами [Cea et al., 2004; Lindstrom et al., 2014; Ma et al., 2013; Mohammed et al., 2012] для оценки устойчивости склонов, понимания механизмов возникновения оползней и селей, законов их движения по склону, а также механизмов генерации и распространения поверхностных волн, возникающих при входе оползня в водоем.

При построении математических моделей исследуемых явлений целесообразно использовать иерархический подход, реализующий принцип «от простого к сложному», когда после достаточно подробного изучения не очень сложной модели делается следующий шаг, состоящий в отказе от одного или нескольких упрощающих предположений. При этом возникает цепочка (иерархия) все более полных моделей, каждая из которых обобщает предыдущие, включая их в качестве частного случая. Такой подход позволяет поэтапно изучать всё более реалистичные модели, сопоставлять результаты, а в некоторых случаях обосновывать возможность применения упрощенных моделей, позволяющих описывать характеристики явлений с достаточной для практических приложений точностью.

Содержание настоящего доклада связано с разработкой вычислительного инструментария, основанного на упрощенной математической модели, описывающей как сход оползня с криволинейного горного склона, так и движение связанного селя по криволинейному наклонному водотоку, а также с разработкой численных алгоритмов решения задачи о стихийном бедствии, связанном с образованием опасных волн цунами при входе берегового оползня в водоем. В краткой форме приведены результаты верификации численных алгоритмов и валидации используемых математических моделей на наборе тестовых задач и данных лабораторных экспериментов, результаты численного моделирования разрушительного цунами, возникшего при входе берегового оползня в водохранилище Бурейской ГЭС 11 декабря 2018 г., результаты расчетов сценариев прохождения связанного селя по наклонному криволинейному руслу и выноса селевого материала к подножью склона.

Математическая модель движения оползней и связанных селей

Обзор существующих математических моделей и созданных на их основе комплексов программ для численного моделирования оползней и селей дан в книге [Михайлов и Черноморец, 2011]. Для описания движения оползня по криволинейному склону часто используется модель движения твердого недеформируемого тела по



плоскому склону [Ataie-Ashtiani *et al.*, 2011; Delis *et al.*, 2011; Grilli *et al.*, 2005]. В работе [Ma *et al.*, 2013] оползни моделируются водно-песчаными смесями, в [Sabeti *et al.*, 2022] создана численная модель движения зернистого оползня, а в [Ward *et al.*, 2011] в качестве модели оползня взято множество упруго взаимодействующих между собой твердых шаров. В сообщении [Иванова и др., 2020] движение оползня по склону рассматривалось как поток сыпучего материала.

Исследованию селевых потоков также посвящено множество научных публикаций. Наибольшее число работ связано с описанием полевых наблюдений последствий селевых потоков, изучением русел, по которым они распространяются, изучением геоморфологических, гидрологических и реологических условий возникновения селевых потоков [Malet *et al.*, 2005]. Много работ посвящено исследованию селевых потоков с помощью инженерных (гидравлических) методик и формул. Чаще всего методы этого направления основаны на использовании сложных аналитических формул, насыщенных большим количеством эмпирических констант [Натишвили и Тевзадзе, 2007; Натишвили и Тевзадзе, 2011; Тевзадзе и Гавардашвили, 1995]. В связи со сложностью лабораторного моделирования, связанной с трудностью изготовления макетов реальных водотоков, работ этого направления значительно меньше (см., напр., [deLange *et al.*, 2020; Shrestha *et al.*, 2008]). В последние десятилетия стали бурно развиваться методы численного моделирования селей на основе тех или иных математических моделей [Михайлов и Черноморец, 2011]. В работах по численному моделированию селей в основном используются уравнения мелкой воды, дополненные источниками членами, в которых учитываются различные физические факторы, влияющие на движение селя и его взаимодействие с ложем русла и его бортами [Brien *et al.*, 1993; Zic *et al.*, 2015]. В статье [Cetina *et al.*, 2003] предложен оригинальный подход к моделированию селей, заключающийся в применении комбинированной методики: в верхних частях движения селя, где селевой поток находится в крутом узком каньоне, используются одномерные модели, а ниже по течению, на относительно пологих участках более широкого русла, применяются двумерные модели.

Далее представлена математическая модель, которая использовалась нами для численного решения задач:

- 1) об оползнях на горных склонах,
- 2) о подводных оползнях,
- 3) о береговых оползнях, обрушающихся в водоемы (рис. 1),
- 4) о движении связанных селей по криволинейным водотокам с меняющейся формой поперечного сечения (рис. 2).



а



б

Рис. 1. Обрушение берегового оползня: в водохранилище Бурейской ГЭС [Gusiakov *et al.*, 2021] (а); в водохранилище «Три ущелья» [Huang *et al.*, 2016] (б)

Для моделирования реальных ситуаций необходимо учитывать неровность горного или подводного склона и возможность деформации оползня или связанного селя. Рассмотрим вначале математическую модель для задачи 3, которая является наиболее общей. При выводе уравнений движения выполнялось разбиение объема берегового оползня на бесконечное число блоков, а в качестве силы, приводящей его в движение по



склону, принималась интегральная сумма сил тяжести, трения, плавучести и сопротивления, действующих на бесконечно малые элементарные объемы [Khakimzyanov et al., 2020]. В рамках модели квазидеформируемого тела форма его поверхности меняется в соответствии с встречающимися по ходу движения неровностями рельефа (как у деформируемого тела), а мгновенные горизонтальные компоненты вектора скорости одинаковы в каждой точке оползня (как у твердого тела).

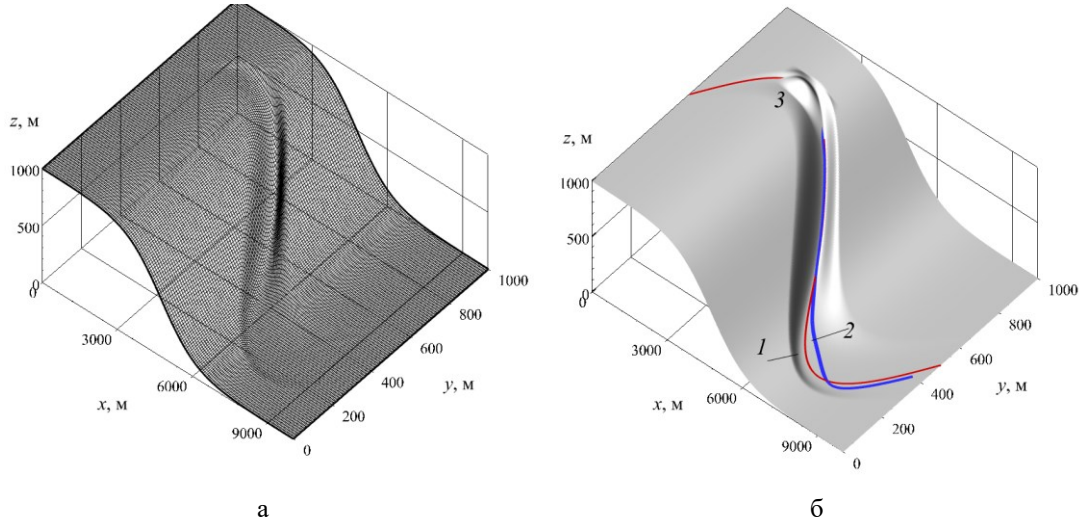


Рис. 2. К задаче о движении связанного селе: (а) – цифровая модель горного склона с криволинейным водотоком; (б) – траектория движения связанного селе (2) из начального положения (3), 1 – тальвег русла

Движение берегового оползня определяется следующей системой из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv_\alpha}{dt} = \frac{R_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{g_{\alpha\alpha}}}{(\gamma + C_{\text{add}}(\mathbf{x}_c(t)))V} \left[g(I_{1,\alpha} + \sigma_\alpha I_2) + \sigma_\alpha \left(\gamma(u^2 I_{3,11} + 2uv I_{3,12} + v^2 I_{3,22}) + \frac{C_{\text{res}}(\mathbf{x}_c(t))}{2} \Pi v_c^2 \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{dx_c}{dt} = u, \quad \frac{dy_c}{dt} = v, \quad (2)$$

где $\alpha = 1, 2$, g – ускорение свободного падения, $\gamma = \rho_{\text{sl}}/\rho_w > 1$, ρ_w – плотность воды, ρ_{sl} – плотность оползневой массы, V – объем оползня,

$$\sigma_\alpha = \frac{v_\alpha}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}} v_c}, \quad R_\alpha = \frac{\partial g_{11}}{\partial x^\alpha} u^2 + 2 \frac{\partial g_{12}}{\partial x^\alpha} uv + \frac{\partial g_{22}}{\partial x^\alpha} v^2. \quad (3)$$

Предполагается, что оползень, ограниченный снизу твердым склоном $z = h(x, y)$, а сверху поверхностью $z = h(x, y) + h_{\text{sl}}(x, y, t)$, где $h_{\text{sl}}(x, y, t) > 0$, начинает свое движение из состояния покоя с заданной начальной формой $h_{\text{sl}}(x, y, 0) = h_{\text{sl}}^0(x, y)$ оползневой массы и скользит без отрыва по криволинейной поверхности склона, геометрические характеристики которого определяются компонентами метрического тензора

$$g_{11} = 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2, \quad g_{12} = g_{21} = \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}, \quad g_{22} = 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2. \quad (4)$$



Уравнения движения квазидеформируемого оползня (1), (2) базируются на предположении о том, что в каждый момент времени его положение определяется точкой $\mathbf{x}_c(t) = (x_c(t), y_c(t), z_c(t))$, скользящей по поверхности $z = h(x, y)$, при этом $(x_c(t), y_c(t)) \in D_t$, $z_c(t) = h(x_c(t), y_c(t))$, D_t – ортогональная проекция трехмерной области, занятой оползневой массой, на плоскость $z = 0$ декартовой системы координат $Oxyz$, ось Oz которой направлена вертикально вверх. Форма оползня определяется формулой $h_{sl}(x, y, t) = h_{sl}^0(x + x_c(0) - x_c(t), y + y_c(0) - y_c(t))$.

Первые две ковариантные компоненты v_α вектора скорости $\mathbf{v}_c$ точки $\mathbf{x}_c(t)$ определяются путем решения нелинейных уравнений (1). Нелинейность этих уравнений обусловлена тем, что в их правые части входят зависящие от искомым величин v_α декартовы компоненты

$$u = \frac{g_{22}v_1 - g_{12}v_2}{G}, \quad v = \frac{-g_{21}v_1 + g_{11}v_2}{G} \quad (5)$$

вектора $\mathbf{v}_c$, а также величина вектора скорости $v_c = |\mathbf{v}_c| = \sqrt{g_{11}u^2 + 2g_{12}uv + g_{22}v^2}$, Π – максимальная площадь сечения оползня плоскостью, перпендикулярной горизонтальной составляющей вектора скорости $\mathbf{v}_c$.

Уравнения движения (1) являются интегро-дифференциальными, поскольку в них входят интегралы, зависящие от искомого решения:

$$I_{1,\alpha}(t) = \iint_{D_t} C_A(\mathbf{x}) \frac{h_{sl}(x, y, t)}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}(x, y)}} \frac{\partial h}{\partial x^\alpha}(x, y) dx dy, \quad I_2(t) = \iint_{D_t} C_A(\mathbf{x}) C_{fr}(\mathbf{x}) \frac{h_{sl}(x, y, t)}{\sqrt{G(x, y)}} dx dy > 0, \quad (6)$$

$$I_{3,\alpha\beta} = \iint_{D_t} C_{fr}(\mathbf{x}) \frac{h_{sl}(x, y, t)}{\sqrt{G(x, y)}} \frac{\partial^2 h}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}(x, y) dx dy, \quad \alpha, \beta = 1, 2, \quad G = g_{11}g_{22} - g_{12}^2 \geq 1, \quad \mathbf{x} = (x, y, h(x, y)), \quad (7)$$

где

$$C_A(\mathbf{x}) = \begin{cases} \gamma, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{dry}, \\ \gamma - 1, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{wet}, \end{cases} \quad C_{fr}(\mathbf{x}) = \begin{cases} C_{fr,1}, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{dry}, \\ C_{fr,2}, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{wet}. \end{cases} \quad (8)$$

Надводный оползень вначале скользит по береговому склону, а в водоеме он перемещается только на финальной стадии движения. Поэтому характеристики движения надводного оползня будут другими, чем в случае подводного. Предполагается, что сила Архимеда действует только на те части оползневой массы, которые попали в воду ($\mathbf{x} \in \Omega_{wet}$), и не действует на надводную часть оползня, расположенную на берегу ($\mathbf{x} \in \Omega_{dry}$). Функция $C_{fr}(\mathbf{x})$ связана с коэффициентом трения, который предполагается разным на склоне и в водоеме. Поэтому используются два значения коэффициента трения скольжения: $C_{fr,1} = \tan \theta_{*,1}$ для надводной части оползня и $C_{fr,2} = \tan \theta_{*,2}$ – для подводной, $\theta_{*,1} > \theta_{*,2}$.

Функция $C_{res}(\mathbf{x})$ предназначена для учета отличий сопротивлений окружающей среды при движении оползня в воздухе и в воде:

$$C_{res}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{dry}, \\ C_d, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{wet}, \end{cases} \quad (9)$$



то есть предполагается, что сопротивление воздуха пренебрежимо мало, а сопротивление воды определяется постоянным коэффициентом $C_d > 0$.

В уравнении (1) учитывается также присоединенная масса воды при движении подводной части оползня. Коэффициент присоединенной массы $C_w > 0$ становится значительным только при входе оползня в воду, для надводной части он пренебрежимо мал в силу относительно малой плотности воздуха. Этот эффект учитывается функцией

$$C_{\text{add}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{\text{dry}} \\ C_w, & \text{если } \mathbf{x} \in \Omega_{\text{wet}} \end{cases}. \quad (10).$$

Для модели подводного оползня (задача 2) следует положить $\Omega_{\text{dry}} = \emptyset$. При численном решении задач о движении оползня на горном склоне (задача 1) и задач о движении связанных селей по наклонным руслам (задача 4) полагается $\Omega_{\text{wet}} = \emptyset$. Для описания таких движений необходимо иметь подробную цифровую модель изучаемого горного бассейна и конкретного русла, а также выполнять тщательную калибровку параметров, входящих в дифференциальные уравнения и влияющих на характеристики селя.

Нелинейные уравнения (1), (2) решались численно с помощью метода Рунге – Кутты до того момента времени, когда в результате воздействия на оползень сил трения и сопротивления воды произойдет его остановка.

О тестовых задачах

Создание надежных алгоритмов для расчета селевых потоков требует не только теоретического анализа математических моделей и применяемых для их реализации численных методов, но и проверки их на тестовых задачах, которые отражают основные физические аспекты рассматриваемого явления. Такая проверка должна выполняться путем верификации численного алгоритма и валидации математической модели.

Сравнения с расчетами других авторов, с известными данными лабораторных экспериментов и натурных наблюдений показали эффективность использования уравнений движения (1), (2) квазидеформируемого оползня при численном решении задач о генерации поверхностных волн оползнями, возникающими на подводных склонах морских акваторий [Chubarov et al., 2005; Beisel et al., 2012; Khakimzyanov et al., 2015; Gusev et al., 2019].

Для «селевых» и «оползневых» задач важным аспектом задачи конструирования системы тестов является формирование модельных рельефов водотоков и склонов (см., напр., рис. 2). Выполнена верификация численного алгоритма решения уравнений (1), (2) путем сравнения результатов расчетов с точным решением задачи о сходе берегового оползня в случае плоского берегового склона [Чжао, 2024], с точным решением задачи о движении связанного селя в прямолинейном водотоке постоянного поперечного сечения, с точным решением задачи о генерации бора при входе берегового оползня с постоянной скоростью в водоем с горизонтальным дном $h(x) = h_0 = \text{const}$. Были выполнены также сравнения с результатами расчетов других авторов процесса образования волн при движении левой стенки бассейна по заданному закону, в частности, когда вертикальная стенка (рис. 3а), возвышающаяся над поверхностью воды, вначале движется с постоянной скоростью, а затем останавливается [Cea et al., 2004]. Отличие хронограмм связано с тем, что в наших расчетах использовались очень мелкие сетки, что приводило к более точному представлению динамики изменения уровня воды. Остальные параметры, такие как амплитуда начальной волны, максимум свободной поверхности на левой стенке, время резкого падения уровня воды после остановки стенки, хорошо согласуются с численными результатами, представленными в [Cea et al., 2004].



Задача о генерации волн движением стенки имеет непосредственное отношение к задаче входа высокого надводного оползня в воду, поэтому эта задача использовалась для валидации разработанной модели генерации волн оползнем, в частности, путем сравнения (рис. 3б) полученных численных решений с данными лабораторных экспериментов [Sander *et al.*, 1992], в которых волны возникали при движении по заданному закону наклонной левой стенки бассейна.

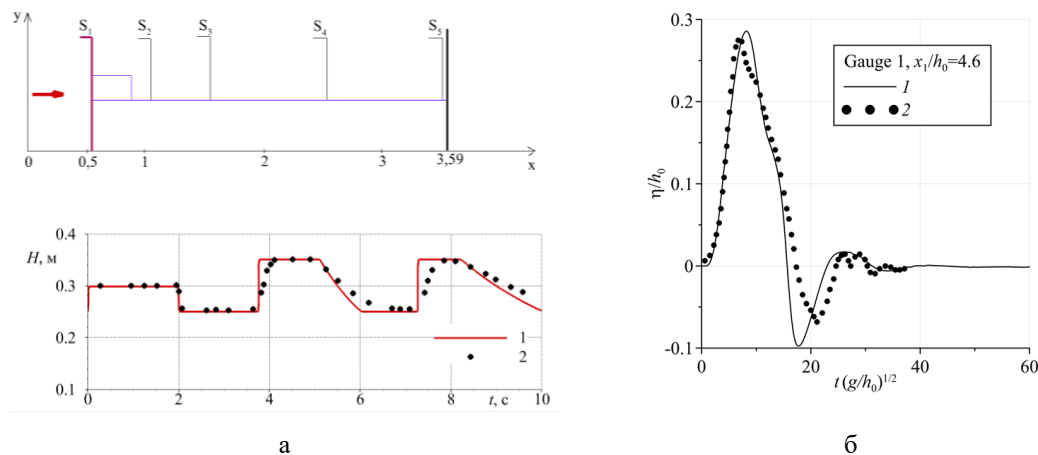


Рис. 3. Генерация поверхностных волн подвижной левой стенкой бассейна: хронограмма свободной границы, рассчитанная в настоящей работе (1) и (а) – в расчетах [Cea *et al.*, 2004] (2) для волномера S_1 , прикрепленного к стенке; (б) – в экспериментах [Sander *et al.*, 1992] в точке $x/h_0 = 4.6$

Валидация математической модели движения оползня (1), (2) выполнена на оцифрованном рельефе береговых склонов и дна водохранилища Бурейской ГЭС. Геометрические размеры начальной оползневой массы взяты из [Коковкин, 2020; Кулаков и др., 2019; Махинов и др., 2019], значения параметров C_w и C_d взяты такими же, как для подводного оползня [Khakimzyanov *et al.*, 2020], плотность оползневой массы ρ_{sl} взята из работы [Иванова и др., 2020]. На основе вычислительных экспериментов найдены значения коэффициентов трения $C_{fr,1}$ и $C_{fr,2}$, при которых оползень прекращает свое движение непосредственно в ложе водохранилища, перекрывая его плотиной, что наблюдалось в реальном событии (см. рис. 1а).

Для численного исследования поверхностных волн, возникающих при оползнях, авторы использовали иерархию одномерных, двумерных и трехмерных математических моделей. Для созданной цепочки математических моделей разработана иерархия конечно-разностных алгоритмов на адаптивных сетках для численного решения задач о генерации поверхностных волн оползнями, в том числе и алгоритмы расчета наката волн на берег [Gusev *et al.*, 2023] и их силового воздействия на неподвижные полупогруженные в воду сооружения (рис. 4).

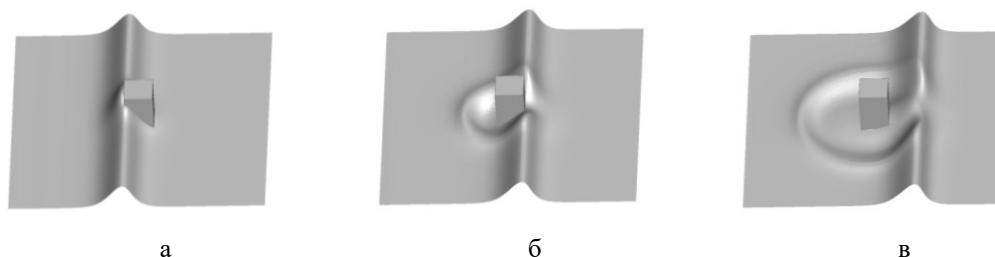


Рис. 4. Форма свободной поверхности при накате уединенной волны на полупогруженное сооружение: $t\sqrt{g/h_0} = 18.79$ (а); 28.19 (б); 37.58 (в)



В иерархическую цепочку входят нелинейные бездисперсионные и нелинейно-дисперсионные модели мелкой воды, модель потенциальных течений идеальной жидкости, модель уравнений Навье-Стокса течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной границей. Каждая из моделей имеет свою ценность, важное значение для понимания характеристик взаимодействия волн с сооружениями. Результаты верификации алгоритмов и валидации моделей показывают, что в случае слабой зависимости параметров течения от одной из горизонтальных координат удовлетворительные результаты могут быть получены даже в рамках одномерных нелинейных моделей мелкой воды. Выполнено многопараметрическое исследование степени влияния на взаимодействие с полупогруженными сооружениями формы набегающих волн, их амплитуды и длины [Гусев и др., 2022], горизонтальных размеров сооружения, осадки полупогруженного объекта, формы неровности дна перед сооружением, о влиянии причальной стенки, вблизи которой находится конструкция [Скиба и др., 2025], о влиянии дифракционных эффектов на значения максимальных заплесков на грани сооружения, на максимальные значения горизонтальных и вертикальных компонент силовой нагрузки. Достоверность результатов численного моделирования основывается на успешном сопоставлении с результатами расчетов других авторов, с данными лабораторных измерений, на тестировании разработанных алгоритмов как на известных тестах, так и на новых, созданных авторами.

Некоторые результаты численного моделирования

11 декабря 2018 г. случилось обрушение левого берегового склона водохранилища Бурейской ГЭС и возник крупный оползень, который полностью перекрыл русло водохранилища и вызвал сильное цунами, затопившее пологий правый берег на значительную высоту. Движение оползня по склону рассматривается в одномерном приближении в рамках модели квазидеформируемого тела (1), (2) с учетом кривизны рельефа и различий коэффициентов трения на суше и в воде. Расчет поверхностных волн, сгенерированных оползнем, выполнялся в рамках модели мелкой воды в одномерном приближении с учетом неровного дна водохранилища, подвижной границы, имитирующей вход оползневой массы в воду, и подвижной линии уреза [Khakimzyanov *et al.*, 2016] при накате цунами на правый берег.

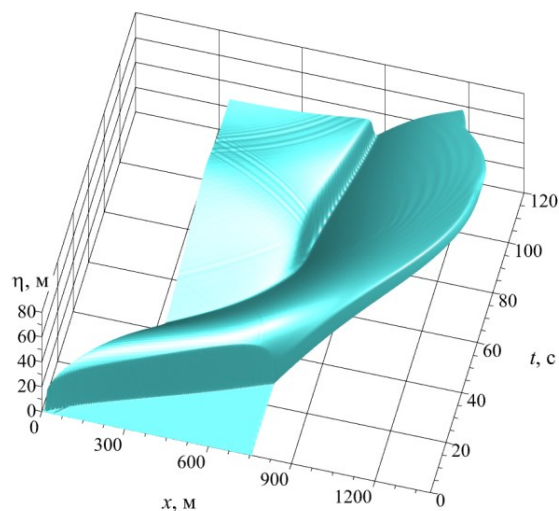
На рис. 5а показана динамика свободной поверхности воды. Видно, что оползень генерирует волну в виде бора. В процессе движения бор трансформируется в волну с вертикальным передним фронтом, сглаженной вершиной и пологим задним склоном. В момент, когда сгенерированная волна достигает правого берега, возникает мощный заплеск. После того, как точка уреза достигнет максимальной высоты, начинается сток воды с берега назад в водохранилище. В окрестности первоначального уреза образуется волна в виде стоячего бора, а также отраженная от берега волна, которая начинает двигаться по водохранилищу в направлении, обратном движению набегающей волны. К этому моменту точка уреза на правом берегу уже движется вниз от своего крайнего самого высокого положения, при котором высота заплеска достигла примерно 70 метров (рис. 5б).

В [Gusiakov *et al.*, 2021] отмечается, что напротив оползня высота максимального вертикального заплеска на правый берег водохранилища была до 62 м, если судить по полностью срезанным деревьям и разрушенному почвенному покрову, однако по аэрофото- и спутниковым снимкам видно, что вода прошла еще дальше и реальный заплеск был на 5–10 м выше линии полного уничтожения леса. Таким образом, наш численный результат в 70 м находится в очень хорошем соответствии с натурными наблюдениями.

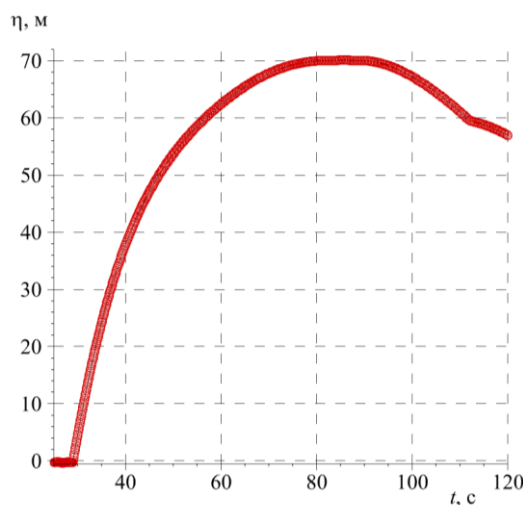
На практике поверхность реального склона задается не аналитически, а набором точек, поэтому в расчетах движения связного селя используется цифровая модель рельефа (рис. 2а). Для того чтобы выяснить влияние того или иного параметра (угол трения, координаты начального расположения селя, его размеры) на характеристики движения связного селя по цифровому рельефу, выполнены вычислительные



эксперименты, в которых изменялся только один из параметров, а остальные оставались неизменными. На основе результатов экспериментов по численному моделированию движения связного селевого потока в наклонном водотоке сложной формы, расположенном на оцифрованном модельном горном склоне, можно сделать вывод о том, что коэффициент трения и высота места старта селевой массы имеют более важное значение в вопросе о траектории движения связного селя (линия 2 на рис. 2б) и месте его остановки, чем другие рассмотренные параметры, входящие в уравнения движения (1).



а



б

Рис. 5. Динамика свободной поверхности воды $z = \eta(x, t)$ при распространении сгенерированной оползнем волны поперек водохранилища и ее наката на правый берег (а); хронограмма движения точки уреза на правом берегу водохранилища (б)

Особый интерес представляет изучение конусов выноса, образованных скоплением материала, отложенного селевыми потоками у подножия склона. Для этого используются лабораторные методы исследования [Натишвили и др., 2011; Степанов и др., 2014; Яфязова, 1996] и методы численного моделирования [Михайлов и Черноморец, 2011]. В экспериментах [Степанов и др., 2014] формирование конуса выноса исследовалось путем многократного запуска модели связного селя по наклонному желобу. Такая же методика формирования конуса выноса применяется в настоящей работе на основе численного моделирования. После прохождения по водотоку очередная селевая волна останавливается в основании склона и за счет своей формы изменяет



рельеф в месте выхода водотока к основанию склона, изображенного на рис. 2. Следующая селевая волна уже пойдет по измененному рельефу, поэтому траектория движения и точка остановки будут другими (рис. 6а). В результате в основании склона формируется новый рельеф, который является моделью образовавшегося конуса выноса с бугристой формой поверхности. Показано, что на форму конуса выноса существенно влияют коэффициент трения, место старта селевых волн и рельеф водотока в его основании. Из рис. 6а видно, что основная часть отложений возникла на левом склоне водотока. Возможным объяснением этого является то, что склон водотока слева от тальвега имеет более пологую форму, чем правый склон (см. рис. 2б).

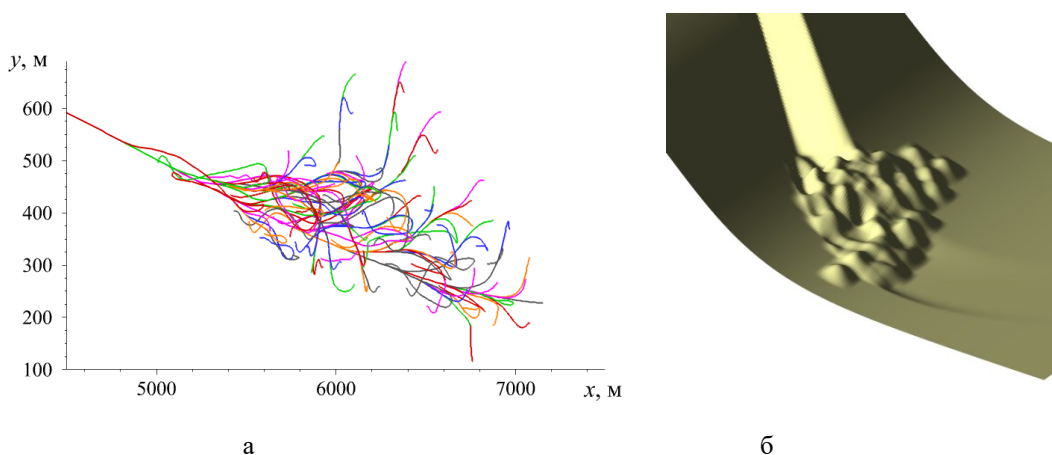


Рис. 6. Проекция на плоскость Oxy траекторий движения отдельных селевых волн (а) и конус выноса, сформировавшийся у подножия склона (б)

Благодарности

Исследования воздействия поверхностных волн на прибрежные сооружения выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Список литературы

- Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С. Силовое воздействие длинных поверхностных волн на полупогруженное в воду тело. I. Влияние формы набегающей волны // Вычисл. технологии, 2022, 27(4): 33–62.
- Иванова А.А., Куликов Е.А. Оползневое цунами на р. Бурея // II Всеросс. научн. конф. «Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз»: Сб. тез. докл., М.: Научн. совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2020. С. 25–26.
- Коковкин А.А. Феномен Бурейского оползня: данные полевых исследований и модель формирования // Отечественная геология, 2020, 4–5: 48–63.
- Кулаков В.В., Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2019, 3: 12–20.
- Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурея и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестн. Дальневосточного отд. РАН, 2019, 2: 35–44.
- Михайлов В.О., Черноморец С.С. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. М.: МГУ, 2011. 131 с.
- Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Основы динамики селей. Тбилиси: Институт водного хозяйства Национальной академии наук Грузии, 2007. 214 с.
- Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Волны в селях. Тбилиси: Институт водного хозяйства Национальной академии наук Грузии, 2011. 160 с.
- Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Селевые процессы и селетехнические сооружения. Т. 3. Алматы: Институт географии МОН РК, 2014. 434 с.



- Тевзадзе В.И., Гавардашвили Г.В. Определение скорости связанного селевого потока с учетом коэффициента лобового сопротивления воздуха // Сообщения АН Грузии, 1995, 151(3): 444–447.
- Чжао Л. Численное моделирование волн, вызванных сходом оползня или связанного селя в водохранилище // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. С. 550–562.
- Яфязова Р.К. Особенности механизмов формирования конусов выноса горных рек // Гидрометеорология и экология, 1996, 2: 175–187.
- Ataie-Ashtiani B., Yavari-Ramshe S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs // Landslides, 2011, 8: 417–432.
- Beisel S.A., Chubarov L.B., Dutykh D., Khakimzyanov G.S., Shokina N.Yu. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide in a bounded reservoir // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2012, 27(6): 539–558.
- O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // J. Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244–259.
- Cea L., Ferreira A., Vazquez-Cendon M.E., Puertas J. Experimental and numerical analysis of solitary waves generated by bed and boundary movements // Int. J. Numer. Methods Fluids, 2004, 46(8): 793–813.
- Cetina M., Krzyk M. Two-dimensional mathematical modelling of debris flows with practical applications // In: Water Pollution VII: Modelling, Measuring and Prediction. WIT Transactions on Ecology and the Environment, WITpress, 2003, 65: 435–444.
- Chubarov L.B., Eletskij S.V., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Simulation of surface waves generation by an underwater landslide // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2005, 20(5): 425–437.
- Delis A.I., Kazolea M. Finite volume simulation of waves formed by sliding masses // Int. J. Numer. Methods Biomedical Eng., 2011, 27: 732–757.
- Fructus D., Grue J. An explicit method for the nonlinear interaction between water waves and variable and moving bottom topography // J. Comput. Physics, 2007, 222(2): 720–739.
- Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Bulgarian tsunami on 7 May 2007: numerical investigation of the hypothesis of a submarine-landslide origin // In: Subaqueous Mass Movements and their Consequences: Assessing Geohazards, Environmental Implications and Economic Significance of Subaqueous Landslides (D.G. Lintern, D.C. Mosher, L.G. Moscardelli et al., editors), 477. London: Geological Society, Special Publications, 2019, p. 303–313.
- Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Skiba V.S., Chubarov L.B. Numerical modeling of the long surface wave impact on a partially immersed structure in a coastal zone. I. Solitary waves over a flat slope // Physics of Fluids, 2023, 35(8): 087124.
- Gusiakov V., Makhinov A. December 11, 2018 landslide and 90-m icy tsunami in the Bureya water reservoir // In: Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk: Vol. 1. Sendai Landslide Partnerships and Kyoto Landslide Commitment, Springer, 2021, 351–360.
- Higman B., Shugar D.H., Stark C.P. et al. The 2015 landslide and tsunami in Taan Fiord, Alaska // Scientific Reports, 2018, 8: 12993.
- Huang B., Yin Y., Du C. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015 // Landslides, 2016, 13: 603–616.
- Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Gusev O. Dispersive Shallow Water Waves. Theory, Modeling, and Numerical Methods. Basel: Birkhauser, 2020. 284 p.
- Khakimzyanov G.S., Gusev O.I., Beisel S.A., Chubarov L.B., Shokina N.Yu. Simulation of tsunami waves generated by submarine landslides in the Black Sea // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2015, 30(4): 227–237.
- Khakimzyanov G., Shokina N.Yu., Dutykh D., Mitsotakis D. A new run-up algorithm based on local high-order analytic expansions // J. Comput. Applied Math., 2016, 298: 82–96.
- de Lange S.I., Santa N., Pudasaini S.P., Kleinhans M.G., de Haas T. Debris-flow generated tsunamis and their dependence on debris-flow dynamics // Coast. Eng., 2020, 157: 103623.
- Lindstrom E.K., Pedersen G.K., Jensen A., Glimsdal S. Experiments on slide generated waves in a 1:500 scale fjord model // Coast. Eng., 2014, 92: 12–23.
- Ma G., Kirby J.T., Shi F. Numerical simulation of tsunami waves generated by deformable submarine landslides // Ocean Modelling, 2013, 69: 146–165.
- Malet J.-P., Laigle D., Remaitre A., Maquaire O. Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows // Geomorphology, 2005, 66(1-4): 215–235.
- Mohammed F., Fritz H.M. Physical modeling of tsunamis generated by threedimensional deformable granular landslides // J. Geophys. Res., 2012, 117: C11015.



- Paris A., Okal E.A., Guérin C. et al. Numerical modeling of the June 17, 2017 landslide and tsunami events in Karrat Fjord, West Greenland // *Pure and Applied Geophys.*, 2019, 176: 3035–3057.
- Sabeti R., Heidarzadeh M. Numerical simulations of water waves generated by subaerial granular and solid-block landslides: Validation, comparison, and predictive equations // *Ocean Eng.*, 2022, 266(3): 112853.
- Sander J., Hutter K. Evolution of weakly non-linear shallow-water waves generated by a moving boundary // *Acta Mechanica*, 1992, 91(3-4): 119–155.
- Sepulveda S., Serey A. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5°S) // *Andean Geology*, 2009, 36(1): 131–136.
- Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y. Numerical simulation on debris-flow deposition and erosion processes upstream of a check dam with experimental verification // *Annals of Disastrous Preventing Research Institute, Kyoto University*, 2008, 51 B: 613–624.
- Ward S.N., Day S. The 1963 landslide and flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation // *Italian J. Geosciences*, 2011, 130: 16–26.
- Xu W.-J., Dong X.-Y. Simulation and verification of landslide tsunamis using a 3D SPH-DEM coupling method // *Computers and Geotechnics*, 2021, 129: 103803.
- Zic E., Arbanas Z., Bicanic N., Ozanic N. A model of mudflow propagation downstream from the Grohovo landslide near the city of Rijeka (Croatia) // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15: 293–313.