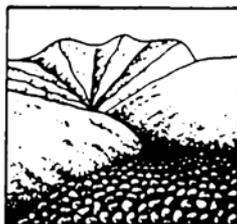


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



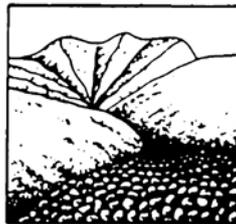
Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



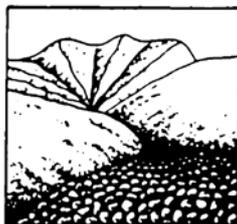
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

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 (Tsozne 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



Математическое, информационно-вычислительное и экспериментальное моделирование этапов зарождения, схода и управления селевыми процессами на примере северного склона хребта Хамар-Дабан

И.В. Бычков

*Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова
СО РАН, Иркутск, Россия, bychkov@icc.ru*

Аннотация. В публикации на основе междисциплинарного комплекса натурального, экспериментального и математического моделирования этапов зарождения и схода селевых потоков будут представлены подходы к методам управления селевыми процессами, направленные на снижение селевой активности, характеризующейся показателями повторяемости, и объема селевых выносов, на примере северного склона хребта Хамар-Дабан.

Ключевые слова: селевой поток, управление, моделирование

Ссылка для цитирования: Бычков И.В. Математическое, информационно-вычислительное и экспериментальное моделирование этапов зарождения, схода и управления селевыми процессами на примере северного склона хребта Хамар-Дабан. 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. 77–81.

Mathematical, information-computational and experimental modelling of the stages of debris flow initiation, descent and management on the example of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge

I.V. Bychkov

*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, bychkov@icc.ru*

Abstract. The paper will present approaches to methods of debris flow management based on an interdisciplinary complex of in-situ, experimental and mathematical modelling of the stages of debris flow initiation and descent, aimed at reducing debris flow activity, characterized by the indicators of recurrence and volume of debris flow discharge, on the example of the northern slope of the Khamar-Daban ridge.

Key words: debris flow, control, modeling

Cite this article: Bychkov I.V. Mathematical, information-computational and experimental modelling of the stages of debris flow initiation, descent and management on the example of the northern slope of the Khamar-Daban Ridge. 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. 77–81.



Введение

Главной целью представляемого исследования является разработка цифровой платформы комплексного исследования, моделирования, анализа и прогнозирования развития селевых процессов на основе детальных гидрологических, климатических, метеорологических, геологических и геоморфологических исследований, предложение сценариев управления искусственно вызванным селевым потоком в районе промплощадки ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» (БЦБК), методов моделирования и численного исследования зон селеобразования (питания селей водой и твердой составляющей), транзита (движение селевого потока) и разгрузки (массового отложения селевых выносов с определением оценки возможности достижения ими зоны размещения шламохранилищ).

Обзор проблемы

Объем отходов БЦБК оценивается в более чем 6 млн тонн загрязняющих веществ, в том числе около 5 млн тонн шлам-лигнина – желеобразной массы, образующейся в процессе производства целлюлозы. Загрязняющие вещества все активнее просачиваются через деградирующие фильтрационные барьеры. На фоне высокой сейсмичности в Байкальской рифтовой системе наблюдаются оползневые явления, а нестабильная метеорологическая обстановка с активизацией ливневых и паводковых проявлений провоцирует селевые потоки. Существует реальная угроза разрушения карт-накопителей отходов во время селевых потоков с попаданием их содержимого в озеро Байкал, что вызовет катастрофические последствия для экологии Байкала. Сегодня велик риск переполнения карт-накопителей паводковыми и ливневыми водами, что приведет к выносу высокотоксичных загрязняющих веществ в акваторию оз. Байкал, береговая линия которого находится менее чем в 400 метрах от ближайших хранилищ отходов.

Эта задача может быть решена только в рамках междисциплинарного подхода, объединяющего усилия специалистов в области информационных технологий, геологии, гидрологии, геоморфологии, математики, вычислительных технологий и физики. Планируется привлечение к решению этой задачи исследовательских групп Иркутска, Новосибирска и Москвы, а также имеющегося у них методического, алгоритмического и программного заделов, с целью создания научных основ для научного обеспечения и предотвращения экологической катастрофы с потенциально тяжелыми последствиями для озера Байкал.

Научный задел

У коллектива исполнителей имеется большой опыт в области обработки разноформатных данных (в том числе данных дистанционного зондирования Земли) и создания информационно-вычислительных систем в различных отраслях. В рамках гранта Минобрнауки России в Институте динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН разработана цифровая платформа экологического мониторинга Байкальской природной территории, обеспечивающая сбор (5 направлений мониторинга, интервал регистрации 1–5 с, ежедневно более 20 Гбайт разноформатных данных), хранение, обработку больших массивов гетерогенных пространственно-временных данных, а также инструментальные и инфраструктурные сервисы для разработки и выполнения прикладных программ для анализа и прогнозирования экологической обстановки на основе математических моделей, сервисов и методов машинного обучения.

Исследователями Института вычислительного моделирования и математической геофизики СО РАН созданы методы математического моделирования многочастичных систем с различными приложениями, методы суперкомпьютерного моделирования в гидродинамике, методы моделирования фильтрации жидкостей через различные



геологические среды, методы моделирования распространения взрывной волны в грунте, методы прогнозирования метеорологических и гидрологических характеристик, разработаны методы решения обратных задач для определения параметров моделей, создана ГИС-платформа ИТРИС для визуализации геофизических данных и результатов моделирования.

Учёными Лимнологического института СО РАН созданы цифровые модели рельефа подводного склона Байкала в районе ОАО «БЦБК» до 50 м, и в рамках этого проекта планируется дополнить их моделями для глубин 1–50 м. Проведены испытания дрейфтерных станций и измерителей течений на глубинах 0, 3 и 10 м. Отработаны технологии измерения пульсаций скоростей течений доплеровскими акустическими профилографами в условиях подледного режима. Разработаны собственные технологии по автоматическому измерению уровня рек с передачей информации в онлайн режиме. Станции установлены на реках Селенга, Иркут, Баргузин, Слюдянка. Имеются ряды данных по составу зообентосных сообществ литорали Байкала как до строительства комбината, так и на современном этапе.

В рамках международного проекта РФФИ (конкурс «Россия – Киргизия») исследователями Института горного дела СО РАН разработаны и численно реализованы термо-гидро-геомеханические модели хвостохранилища и защитной дамбы высокогорного рудника «Кумтор» (Киргизская Республика). Посредством ретроспективного анализа проведена валидация модели; предложен метод локализации участка повреждения защитного покрытия дна хвостохранилища на основе решения обратных задач по данным измерения температуры и давления в наблюдательных скважинах. В рамках упругой модели разработан метод реконструкции напряженно-деформированного состояния породного массива по GPS данным, основанный на решении обратных граничных задач.

В Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН есть необходимое современное оборудование и разработаны методики для исследования начального этапа течения типа сель при разрушении модели дамбы из гранулированного материала. Получены данные о динамике процесса в различных областях течения, включая разрушающуюся дамбу и формирующийся поток. Учёные из Института земной коры СО РАН в течение десятков лет проводят геологические, инженерно-геологические и геофизические работы по исследованию бассейнов селеопасных рек Байкальской рифтовой системы. В результате этих работ закартированы районы формирования селей Прибайкалья и Забайкалья, построена карта селеактивности юга Прибайкалья; изучена история селевых проявлений по историческим данным и данным дендрохронологического анализа; описаны максимальные проявления влияния селевой деятельности на объекты инфраструктуры и социальные объекты; детально исследованы источники формирования и пути транзита селепроявлений последних лет, предложены новые подходы к мониторингу селевой опасности с помощью сейсмических станций; выявлены эффекты селепроявлений и проявлений паводковой активности в поле микросейсмических шумов, позволяющие организовать систему наблюдения и экстренного оповещения.

Участие учёных Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова позволит использовать опыт комплексного исследования селевых процессов, основанного на полевых маршрутных обследованиях, и картографирования селей различных генетических типов во многих географических регионах России и мира: Камчатка, Кавказ, Забайкалье, Центральная и Восточная Азия (Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан, Китай, Афганистан), горы Святого Ильи (Канада), Анды (Перу). Созданная в 1964 г. лаборатория снежных лавин и селей составила карты селевой опасности как в масштабе страны, так и для отдельных регионов и селевых бассейнов. Сотрудниками лаборатории разработаны методики оценки селевой опасности, включая действующий СП 479.1325800.2019 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития селевых процессов. Общие требования», при этом применялась технология съёмки селевых бассейнов с беспилотных летательных аппаратов, включая обработку полученных данных в специализированных программных продуктах и



создания на её основе цифровых моделей рельефа; выполнялось моделирование селей с применением двумерных и трехмерных численных моделей гидродинамического типа и моделей, основанных на методе дискретных элементов. На основе предложенных методов были получены результаты моделирования селевых потоков в различных селеопасных районах мира с использованием моделей FLO-2D, RAMMS, Божинского – Назарова, DEBRIS. Разработаны методики зонирования и оценки потенциальной селевой опасности, основанные как на результатах моделирования селей, так и обработке данных полевых обследований и дистанционного зондирования Земли (аэрофото- и космоснимков, цифровых моделей рельефа).

Методы и задачи исследования

Проект предполагает проведение детальных геологических, геоморфологических, гидрологических, климатических, метеорологических исследований района размещения полигона отходов БЦБК, а также информационного, математического и численного моделирования зарождения, развития селевых потоков и методов управления потоками.

Для решения поставленной цели в рамках проекта выделяются следующие конкретные задачи:

1. Создание цифровой платформы комплексного исследования, моделирования, анализа и прогнозирования развития селевых процессов на основе детальных гидрологических, климатических, метеорологических, геологических и геоморфологических исследований района размещения полигона отходов БЦБК.

2. Проведение детального изучения геологических, геоморфологических, климатических условий формирования и повторяемости селевых паводков и катастрофических селей в селеактивных бассейнах хр. Хамар-Дабан в районе расположения карт-накопителей отходов БЦБК. Определение морфометрических параметров зон зарождения и питания твёрдой составляющей селевых потоков с оползневый и эрозионный механизм. По результатам морфометрического анализа территории провести районирование и выделение селевых бассейнов, морфометрические параметры которых имеют потенциал к оползневому механизму.

3. Съёмка зон зарождения, транзита и аккумуляции селевых потоков с использованием БПЛА, создание цифровых моделей рельефа и ортофотопланов.

4. Создание лабораторного стенда для физического моделирования селевого потока. Гидродинамическое моделирование селевых потоков в селевых бассейнах южного побережья озера Байкал с применением двумерных моделей и верификация результатов на основе данных полевых исследований.

5. Применительно к задачам диагностики состояния потенциальных очагов селеформирования создать термо-гидро-геомеханические модели породных и грунтовых массивов. Разработать методы валидации моделей по данным геодезических и температурных пьезометрических измерений, а также критерии оценки устойчивости селевых очагов.

6. Теоретическое и численное исследование «спускового механизма» разрушения дамбы и образования селя в рамках двухскоростного континуума, описывающего совместное движение поровой жидкости и гранулированной среды.

7. Экспериментально-теоретические исследования, направленные на обеспечение механической прочности обваловки прудов-накопителей шлам-лигнина. Создание цифровых двойников прудов, исследование оптимальных схем укрепления стенок, разработка методов мониторинга состояния стенок.

8. Экспериментальные лабораторные исследования течения неньютоновской жидкости при разрушении преграды (дамбы) из гранулированного материала. Исследование динамики разрушения неповрежденной преграды и преграды, ослабленной модельным воздействием взрывного типа, при достижении предельного значения напряжения сдвига в теле преграды. Оценка эффективности проведения взрывных работ в натуральных условиях.



9. Разработка новых и адаптация существующих математических моделей и комплекса программных средств для сценарных расчётов с целью управления искусственно вызванным селевым потоком.

10. Выбор мест для экспериментальных полигонов, позволяющих реализовать комплексную защиту от селевых потоков, позволяющих использовать направленные взрывы, селенаправляющие и селезадерживающие конструкции, гибкие барьеры, и т.д.

Практическая применимость

Построенная в рамках реализации проекта цифровая модель рельефа для гидрологических приложений будет пригодна для картирования различных геофизических признаков и расчета важных морфометрических и гидрометеорологических характеристик с использованием уже существующих средств и функций современных ГИС. Выявленные закономерности формирования селевых потоков и полученный фактический материал о скорости, расходе и плотности селевого потока найдут применение при выделении селеопасных зон и разработке эффективных селезащитных сооружений в регионе, повышающих безопасность эксплуатации объектов экономики регионального и федерального значения. Разработанная цифровая платформа и комплекс реализованных в виде сервисов моделей обеспечат поддержку исследований состояния и развития селеопасных территорий и позволят проводить сценарные расчеты управления искусственно вызванным селевым потоком в районе промплощадки ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат».