

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Юдина Виктория Антоновна

**Оценка характеристик селевых потоков и прорывных паводков
на основе комплекса математических моделей**

1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научные руководители** – *Черноморец Сергей Семенович, кандидат географических наук, доцент*
Виноградова Татьяна Александровна, кандидат географических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – *Голосов Валентин Николаевич, доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева Географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова*
Стром Александр Леонидович, кандидат геолого–минералогических наук, главный специалист Центра службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли (ЦСГНЭО)
Шамов Владимир Владимирович, доктор географических наук, руководитель лаборатории гидрологии и климатологии Тихоокеанского института географии ДВО РАН

Защита диссертации состоится «8» декабря 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 18–01 (тел. +7(495)9392238, факс +7(495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/499039434/>

Автореферат разослан «25» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования прорывных паводков и селевых потоков связана с активным освоением горных территорий, которое невозможно без оценки опасностей. Среди множества горных систем, где наблюдаются селевые потоки, особенно выделяются Кавказские горы, с самой высокой селевой активностью в пределах Российской Федерации [Perov et al., 2017], и Памир, как наиболее значительные горные сооружения по высоте в странах СНГ [Перов, 2012]. В Российской Федерации доля территорий, подверженных селевым потокам, составляет более 10% от общей площади страны [Perov et al., 2017]. При этом, в связи со сведением лесов на склонах, строительными работами в бассейнах селеносных рек, горнодобывающей деятельностью, в частности складированием материала в виде отвалов и терриконов, количество селеопасных бассейнов растет. На территории Северного Кавказа ежегодно регистрируется прохождение селевых потоков в нескольких бассейнах. Одними из наиболее катастрофических селевых потоков, наблюдавшихся в последние десятилетия, были сели в долине реки Герхожан–Су (18–25 июля 2000 г.), в результате чего река Баксан была подпружена с образованием временного озера, и город Тырныауз был частично затоплен. Селевые потоки в данном регионе также могут быть вызваны прорывом ледниковых водоемов.

Также крупные селевые потоки наблюдаются на территории Центральной Азии в частности в Таджикистане [Яблоков, 2009]. Наличие большого количества ледников и ледниковых озер, высокая расчленённость рельефа способствуют образованию здесь катастрофических селевых потоков. Большинство населенных пунктов на территории Горно–Бадахшанской автономной области (ГБАО) Таджикистана располагаются на конусах выносов рек в зоне потенциальной селевой опасности. Таким образом, освоение региона невозможно без всестороннего учета селевых процессов. Сход селевых потоков на территории ГБАО (Западный Памир) наблюдался в долине реки Барсемдара в 2015 году [Черноморец и др., 2015]. В 2002 году катастрофический селевой поток наблюдался в долине реки Дашт в результате прорыва термокарстового озера [Mergili, Schneider, 2011]. В результате активного отступления ледников повышается вероятность возникновения обвалов, оползней, селевых потоков и прорывов ледниковых озер. В связи с тем, что ледниковые озера и селевые очаги

расположены в труднодоступных районах, где отсутствуют систематические наблюдения, прогнозировать их прорывы достаточно сложно. Одним из способов оценки опасности и рисков является математическое моделирование, однако в настоящее время не разработана единая модель, которая бы в полной мере отражала физические процессы, происходящие при опорожнении озера и формировании селевого очага.

Объектами исследования являются долины горных рек, в которых находятся селевые очаги – это долины рек Барсемдара (Западный Памир, ГБАО, Таджикистан) и Герхожан–Су (Северный Кавказ, Кабардино–Балкарская республика, Россия). Также рассматривались ледниковые озера Бодомдара, расположенные на территории ГБАО, Таджикистан.

Предмет исследования – особенности формирования и транспорта селевых потоков.

Цель исследования – анализ и усовершенствование методов расчета характеристик селевых потоков. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ изученности селевых процессов;
- 2) выполнить полевые обследования объектов;
- 3) создать информационную основу для моделирования с использованием спутниковых снимков и съемки с беспилотного летательного аппарата;
- 4) обосновать возможные сценарии развития селевого процесса и выполнить параметризацию моделей для выбранных селевых бассейнов;
- 5) провести гидродинамическое моделирование прорывных паводков и селевых потоков и определить зоны затопления для всех сценариев;
- 6) составить по результатам моделирования карты и рекомендации для органов власти и управления.

Материалы и методы исследования

В работе использовались материалы исследований ледниковых озер Бодомдара, выполненных командой МГУ им. М.В. Ломоносова и Агентства Ага Хана по Хабитат в ходе совместного проекта. Обработка полученных данных производилась с участием автора [Черноморец и др., 2020]. Также в рамках совместного проекта с командой Агентства Ага Хана по Хабитат в ходе экспедиции в 2019 г. с участием автора были получены материалы по селевой долине

Барсемдара. Полевые работы с участием автора в долине реки Герхожан–Су для оценки последствий подвижки оползня Бузулгана, в том числе съемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), долины были проведены в 2020, 2021 и 2022 гг. При подготовке исходных данных для моделирования также использовались цифровая модель рельефа (ЦМР) из открытых источников, такие как ALOS PALSAR с разрешением 12.5 м (для долины рек Бодомдара и Барсемдара) и топографические карты (для долины реки Герхожан–су). Для конусов выносов всех объектов использовались цифровая модель местности (ЦММ) разрешением от 3 до 5 м, полученные в ходе обработки снимков с БПЛА по результатам полевых работ.

Для оценки характеристик прорывного паводка использовался комплекс математических моделей, включая модель прорыва озера, транспортно–сдвиговую модель и гидродинамическую FLO–2D. В процессе работы над диссертацией автором была создана программа **FLOVI** на языке программирования Python [Юдина и др., 2022], в которой были объединены и расширены первые две модели. Далее были обоснованы сценарии формирования селевых потоков, проведена параметризация и адаптация моделей для изучаемых объектов.

Модель прорыва озера (автор Ю.Б. Виноградов) базируется на уравнениях развития внутриледникового или подледникового канала, через который осуществляется сброс воды из озера. Входными данными являются объем озера перед прорывом, начальная температура воды в озере, длина подледникового канала, разница высот между точкой входа и выхода туннеля, морфометрические параметры чаши озера. Результатом моделирования являются гидрографы прорывного паводка.

Транспортно–сдвиговая модель селеобразования (автор Ю.Б. Виноградов). В основе модели лежит предположение, что приращение расхода твердого вещества в процессе формирования прямо пропорционально коэффициенту неустойчивости материала, элементарной потенциальной мощности потока и показателю подвижности селевой массы. Исходными данными для модели являются высота, длина и ширина участков в селевом очаге, расход воды, поступившей в очаг, а также параметры потенциального селевого массива, такие как начальная влажность, угол внутреннего трения и плотность. Параметры потенциального селевого массива были определены в ходе численных

экспериментов, также активно использовались литературные источники [Запорожченко, 2002, Никулин, 2009, Виноградов, Виноградова, 2010, Petrakov et al., 2012]. На выходе из модели были получены гидрографы селевых волн, значения плотности и скорости потока. Рассчитанный таким образом гидрограф использовался в качестве входных данных для модели FLO–2D.

Гидродинамическая модель FLO–2D (авторы Дж. О'Брайен и др.). В основе модели положено решение уравнений Сен–Венана, расчет базируется на регулярных прямоугольных сетках. Важной особенностью модели является возможность расчета движения селевых потоков с использованием реологической модели Бингама [O'Brien, Julien, Fullerton, 1993]. В качестве исходных данных в модели используется ЦМР или ЦММ, на верхней границе модельной области задаются гидрографы прорывного паводка и объемная концентрация потока. Основными калибровочными параметрами модели являются реологические параметры селевого блока. В качестве гидрологических данных в разных сценариях использовались гидрографы, рассчитанные по транспортно–сдвиговой модели селеобразования, модели прорыва озера или по эмпирической формуле. По результатам моделирования были получены карты пространственного распределения скорости и глубины потока, а также гидрографы на выбранных створах.

Защищаемые положения:

1. Разработанная автором программа FLOVI может применяться для оценки селевой опасности в долинах с потенциальными селевыми очагами и прорывоопасными озерами. В качестве входных данных может использоваться ЦМР, полученная до катастрофы.

2. Обосновано применение комплекса математических моделей (транспортно–сдвиговой и гидродинамической) для оценки характеристик потоков в долинах и возможных зон затопления на конусах выноса. Разработана методика с применением данных БПЛА для гидродинамического моделирования затопления конусов выноса.

3. Для разных литодинамических зон при моделировании определяющее значение имеют следующие параметры: для селевого очага – полная влагоемкость потенциального селевого массива, для зоны транзита и аккумуляции –

реологические параметры селевого потока. Это позволяет внести определение данных параметров в рекомендации методики изучения селевых бассейнов.

4. Численными экспериментами подтверждено, что вклад транспортно–сдвигового процесса в формирование расхода селевого потока на вершине конуса выноса может составлять до 93% и выше, для прорывного паводка данная величина будет составлять от 77% и выше.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в использовании комплекса из трёх математических моделей для оценки характеристик прорывных паводков и селевых потоков: модели прорыва озера, транспортно–сдвиговой и FLO–2D. Также автором была разработана компьютерная программа FLOVI на основе первых двух моделей на языке программирования Python. Использование данной программы позволяет учитывать процессы прорыва ледниковых озёр, формирования селевого потока в очаге, а также насыщения потока твёрдым материалом на участках подпитки в русле. Впервые были оценены количественные характеристики селевого потока 2015 года для долины реки Барсемдара. Проведенные численные эксперименты в транспортно–сдвиговой модели позволили выявить чувствительность модели к различным параметрам потенциального селевого массива (ПСМ). Также экспериментальные расчеты в модели FLO–2D проиллюстрировали, как значения параметров реологического блока влияют на величину максимальных расходов и площадей затопления. Для долины реки Бодомдара было впервые выполнено моделирование возможного прорывного паводка. Модель прорыва озера в данном случае использовалась для озера, подпруженного мореной с ледяным ядром, а не ледником. В ходе численных экспериментов в данной модели было выявлено влияние начальной температуры воды в озере и длины подледникового канала на значение максимального расхода прорывного паводка. Также для конуса выноса реки Бодомдара были впервые получены карты пространственного распределения глубин и скоростей потока, что необходимо учитывать при дальнейшем освоении долины. Впервые было определено влияние оползня Бузулган на движение селевых потоков в долине реки Герхожан–Су после его подвижки в 2020 году. Кроме того, к новизне работы стоит отнести активное применение данных, полученные с помощью БПЛА, для моделирования и оценки площадей затопления на конусах выносов горных рек.

Личный вклад автора

- 1) Автором была впервые применена цепочка математических моделей, включающая в себя модель прорыва озера (опорожнение ледникового озера), транспортно–сдвиговая (формирование селевого потока в очаге) и гидродинамическая модель FLO–2D (трансформация потока в долине).
- 2) Была создана компьютерная программа FLOVI на языке программирования Python для расчета селевых потоков и прорывных паводков. В программе использовались уравнения моделей прорыва озера и транспортно–сдвигового селеобразования, разработанные Ю.Б. Виноградовым. Транспортно–сдвиговая модель была усовершенствована. Дополнительно автором были проведены расчеты, показавшие возможность использования данной программы не только в верховьях в селевом очаге, но также и ниже по течению в местах возможной подпитки потока твердым материалом.
- 3) Впервые проведена оценка характеристик возможного прорывного паводка в долине реки Бодомдара, как в результате прорыва одного из озер, так и каскадного прорывного паводка. Все результаты моделирования, включая графики и карты, были получены автором.
- 4) Впервые была выполнена оценка характеристик селевого потока для бассейна реки Барсемдара, где наблюдался массовый сход селевых потоков в 2015 году. Автором были разработаны и выполнены сценарные расчеты селевого потока с различным набором параметров. Дополнительно была проведена оценка возможной зоны затопления при прохождении аналогичного селевого потока с использованием снимков конуса выноса, полученных с БПЛА в августе 2019 года и обработанных автором.
- 5) Осуществлено моделирование селевого потока 2000 года в долине реки Герхожан–Су. Моделирование в зонах подпитки потока твердым материалом в русле выполнялось по транспортно–сдвиговой модели в программе FLOVI, а для участков между этими зонами использовалась модель FLO–2D. Также были разработаны и выполнены сценарии моделирования селевых потоков с учетом современного положения оползня Бузулган. Автор принимал участие в трех циклах полевых работ в долине реки Герхожан–Су с 2020 по 2022 год с целью отслеживания динамики оползня и состояния селевых очагов.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты диссертационного исследования были доложены на 6 конференциях: European Geosciences Union General Assembly (Австрия, 2021 и 2022), XVI Общероссийская научно–практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2021), VIII Всероссийская научно–практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2021), Russia–Brazil–China Seminars on the technology and theory of natural disaster reduction (Чэнду, 2021), Current State of Glaciers, Glaciation and Cryosphere in the Process of Global Warming (Душанбе, 2021).

Также отдельные результаты диссертационной работы были доложены на межведомственном совещании в администрации Эльбрусского района Кабардино–Балкарской республики (город Тырныауз) 20.05.2020 г.

Публикации. Автором опубликовано 4 печатных работы¹ в журналах, определенных положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Практическая значимость

Предложенная методика расчета селевых потоков и прорывных паводков может быть использована для оценки зон затопления как в долинах, где уже наблюдались катастрофические селевые потоки, так и для объектов, где селевые очаги являются потенциальными. Результаты исследований могут быть использованы при освоении и развитии хозяйственной инфраструктуры в долинах селеопасных рек, а также в ходе проведения работ по предотвращению ущерба.

Результаты работы были использованы при выполнении проекта РФФИ № 20–35–90006 «Моделирование селевых потоков (на примере Памира)» и в проектах по батиметрической съемке озёр Памира и оценке их опасности, а также по темам Госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова разделы I.7 (ЦИТИС 121051300175–4), I.10 (ЦИТИС 121051400038–1).

Объем и структура диссертации. Текст диссертация включает в себя введение, 7 глав, заключение, список литературы. Общий объём работы 130 страниц, включая 39 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников включает в себя 177 наименований, в том числе 79 – на иностранных языках.

¹ Часть работ опубликована под прежней фамилией автора (Куровская)

Автор благодарен научным руководителям Черноморцу Сергею Семеновичу за помощь в работе над диссертацией и организацию экспедиционных исследований; Виноградовой Татьяне Александровне за первые шаги в математическом моделировании и невероятную поддержку на всех этапах обучения. Особую благодарность автор выражает Инне Николаевне Крыленко за помощь в освоении модели FLO-2D и ценные советы и предложения по тексту диссертации. Также автор признателен Кидяевой Вере Михайловне за помощь в работе с моделью FLO-2D. Автор приносит благодарность Крыленко Ивану Владимировичу, Савернюк Елене Александровне, Висхаджиевой Карине Сайдовне и сотрудникам команды АКАН за совместные полевые исследования и предоставленные материалы. Также автор благодарен Бобову Руслану Абдураимовичу за логистическую поддержку. Автор признателен Докукину Михаилу Дмитриевичу и Запорожченко Эдуарду Валентиновичу за плодотворные дискуссии. Также автор благодарит сотрудников кафедры гидрологии суши МГУ и лаборатории снежных лавин и селей за ценные замечания и советы. Автор выражает искреннюю благодарность мужу Юдину Никите Евгеньевичу за колоссальную поддержку и терпение. Работу посвящаю своей бабушке Куровской Генриетте Теодоровне.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Состояние проблемы и изученность селевых процессов

Рассмотрены вопросы формирования селевых потоков, приводятся основные определения и классификации. Селевой поток состоит из смеси воды и рыхлообломочных пород. Необходимыми условиями для образования селевого потока считаются следующие: наличие достаточного уклона, поступление большого объема воды и значительное количество рыхлообломочного материала. Отступление ледников сопровождается интенсивным образованием ледниковых озер. За свое время существования ледниковое озеро проходит три стадии развития: стабильное существование; серия последовательных прорывов, интенсивность которых зависит от мощности ледяной дамбы; исчезновение озера. В случае значительного уклона реки и достаточного количества рыхлообломочного материала прорывной паводок может трансформироваться в селевой поток. Также приводятся классификации эмпирических формул для расчета характеристик

селевых потоков и прорывных паводков. Дан краткий обзор моделей прорыва ледниковых озер и для расчета характеристик селевых потоков. В связи с тем, что в настоящее время не разработана единая модель, которая могла бы учитывать весь комплекс процессов, происходящих при прорыве ледниковых озер и образовании селевого очага, приведены примеры использования цепочки математических моделей для усиления их функционала.

Глава 2. Материалы и методы исследований

Приводятся данные дистанционного зондирования, используемые в работе. В качестве данных о рельефе для моделирования использовались данные PALSAR, разрешением 12.5 м. Также применялись топографические карты, которые оцифровывались в программном пакете ArcGIS 10.8.

Полевые работы включали в себя рекогносцировочные обследования, на основании которых были созданы детальные описания долин. В долинах выявлялись потенциальные и действующие селевые очаги, а также возможные участки подпитки. На всех объектах была выполнена съемка с использованием БПЛА, в результате чего были получены цифровые модели местности (ЦММ) с более высоким разрешением, чем полученные по спутниковым снимкам.

Одним из способов оценки характеристик прорыва ледниковых озер являются эмпирические зависимости. Для первичных оценок максимального расхода прорывного паводка могут использоваться формулы, описанных в работах [Huggel, 2004, Costa, 1985].

В связи с тем, что в настоящий момент отсутствует модель, отображающая все процессы, происходящие при прохождении селевого потока, в данной работе использовался комплекс математических моделей (рисунок 1). На основе уравнений моделей прорыва озера и транспортно–сдвиговой [Виноградов, Виноградова, 2008] автором была создана компьютерная программа FLOVI, написанная на языке программирования Python. В случае моделирования прорывного паводка первой моделью в комплексе расчетов является модель прорыва озера, разработанная Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, 1977]. Полученный гидрограф прорывного паводка далее использовался в транспортно–сдвиговой модели [Виноградов, 1980а, Виноградов, 1980б].



Рисунок 1 – Схема применяемого комплекса моделей

Данная модель позволяет получить характеристики селевого потока только в зоне зарождения, для моделирования в долине применялась гидродинамическая модель FLO–2D. В связи с тем, что входными гидрологическими данными для FLO–2D является именно гидрограф, было решено усовершенствовать транспортно–сдвиговую модель путем включения расчета скорости потока. Для этого использовалась формула скорости селя, предложенная Ю. Б. Виноградовым [Виноградов, Виноградова, 2010]. Процесс был автоматизирован в компьютерной программе FLOVI [Юдина и др., 2022]. Для расчета характеристик потока в долине использовалась гидродинамическая модель FLO–2D. В случае, если нет возможности провести подробный реологический анализ селевых отложений, авторы модели предлагают использовать параметры напряжения пластического трения и вязкости, приведенные в работе.

Глава 3. Объекты исследования

В главе рассмотрены основные физико–географические особенности объектов исследования (таблица 1).

Дополнительно приводились характеристики не только объектов исследования, но и главных по отношению к ним рек. Был проведен анализ причин и последствий селевых явлений, произошедших в прошлом.

Таблица 1 – Сводные характеристики объектов исследования

Река	Бассейн	Длина, км	Площадь, км ²	Средняя высота, м	Даты селей
Дармайдован	Бодомдара	12	65.6	3897	–
Барсемдара	Гунт	8.6	28	3912	16–20.07.2015
Герхожан– Су	Баксан	12	76.3	2760	1937, 1960, 1961, 1962, 1977, 1999, 2000, 2011, 2017, 2022

Оценка характеристик прорывного паводка выполнялась на примере прорывоопасных ледниковых озер Бодомдара Верхнее и Бодомдара Нижнее в верховьях реки Дармайдован (приток реки Бодомдара). Верхнее озеро в каскаде возникло в последние десятилетия. Надледниковое положение озера предполагает дальнейший прорыв озера в результате отступления ледника, что может привести к каскадному прорывному паводку, ранее озера не прорывались.

Исследования селевых потоков снегового генезиса на территории Западного Памира проводились для бассейна реки Барсемдара, где в 2015 году наблюдались катастрофические сели. Данный бассейн примечателен тем, что до 2015 года селевых потоков там не наблюдалось, а селевой врез отсутствовал. Исследования данного объекта позволили оценить возможность применения транспортно–сдвиговой модели для долин, где существуют потенциальные селевые очаги, которые еще не перешли в активную фазу развития.

Бассейн реки Герхожан–Су (правый приток реки Баксан) является одним из наиболее селеопасных и наиболее изученных селевых бассейнов на территории Северного Кавказа [Perov et al., 2017]. В 2020 году произошла подвижка оползня Бузулган, расположенного в нижнем течении реки Герхожан–Су, после которой изменились геоморфологические условия на пути будущих селевых потоков и объемы твердого материала, что и было рассмотрено в работе.

Глава 4. Моделирование селевых потоков снегового генезиса

Для расчета характеристик селевого потока 2015 года в долине реки Барсемдара использовался комплекс программ FLOVI и FLO-2D PRO. Для моделирования во FLO-2D использовались три сценария задания входного гидрографа: с использованием коэффициента для оценки максимального расхода передового вала (I сценарий), задавался в первом приближении близкий к 2.5 [Виноградов, Виноградова, 2010], и без его учета (II сценарий), без транспортно-сдвиговой модели (III сценарий). Было проведено сравнение результатов моделирования с имеющимися данным видеосъемки селя, на основе которых определялась скорость селевого потока и приближенно оценивался расход селя. Исходная информация для моделирования была получена с использованием цифровой модели рельефа ALOS PALSAR разрешением 12.5 м до схода селевого потока, датируемой 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м) [Earthdata...]. В транспортно-сдвиговой модели используются следующие параметры селеформирующего массива, такие как начальная влажность (ζ), плотность массы (ρ), угол внутреннего трения породы (φ) (таблица 2).

Таблица 2 – Варианты задания параметров селеформирующих грунтов в транспортно-сдвиговой модели и результаты расчета для I сценария

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
ζ , безразмерная	0	0	0.133	0.133	0.2	0.2	0	0
φ , градусы	40	35	40	35	40	35	40	35
ρ , кг/м ³	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2000	2000
$Q_{\text{макс}}$, м ³ /с	517	525	1630	1886	5523	8283	502	515

Как можно видеть из таблицы 2, наибольшее влияние на значение расхода потока оказывает именно начальная влажность селеформирующего массива. Так, при увеличении влажности от с абсолютно сухого массива до заполненного водой расход возрастает примерно в 13 раз при прочих равных условиях. Также при

увеличении изначальной влажности массива возрастает разница в расходах для вариантов с различными значениями углов внутреннего трения от 2 до 33%.

По результатам сравнения с кадрами видеосъёмки [Куровская и др., 2020], выполненной местными жителями, был выбран 3й вариант расчета. Результаты численных экспериментов в транспортно–сдвиговой модели для II сценария показывают, что при увеличении начальной влажности массива, коэффициентом передового вала можно пренебречь.

В модели FLO–2D использовалась та же цифровая модель рельефа PALSAR. Моделирование во FLO–2D проводилось с использованием различных значений напряжения пластического трения и вязкости потока. В зависимости от заданных параметров разница между максимальными расходами и значением, полученным по видеосъёмке, может составлять от 3 до 115%.

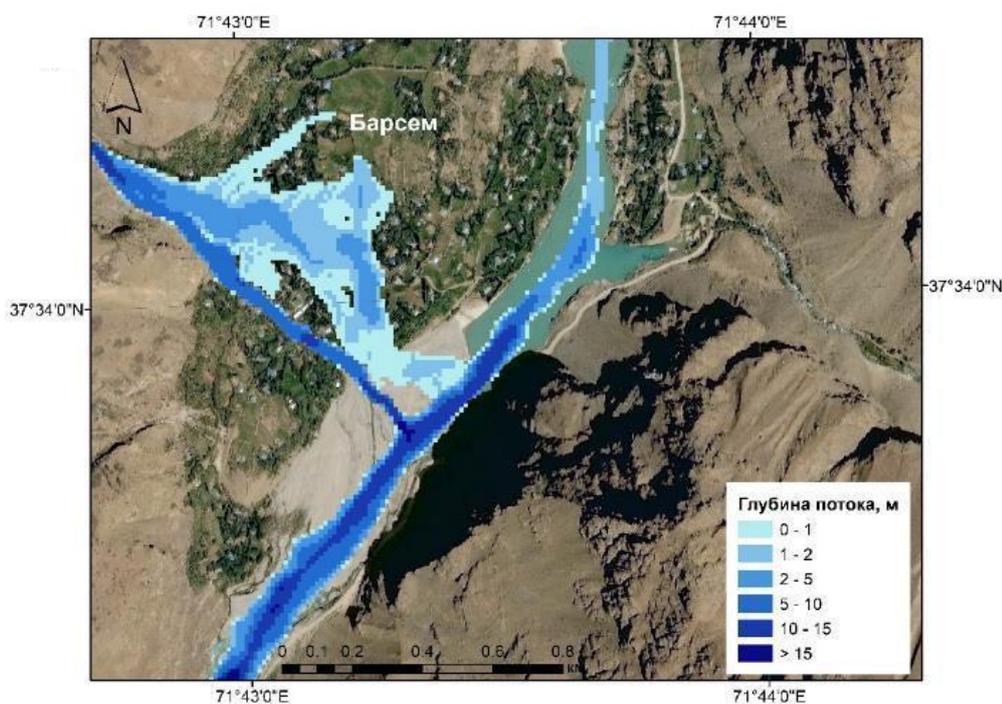


Рисунок 2 – Распределение глубин затопления при прохождении селея 2015 года в долине реки Барсемдара по I сценарию

По результатам моделирования для всех сценариев наблюдается затопление левобережной части конуса выноса, которое в 2015 не наблюдалось (рисунок 2). Это связано с тем, что в модели FLO–2D не учитываются эрозионные процессы. Также использовалась единственная общедоступная ЦМР разрешением 12.5 м, полученная до катастрофы, которая не отображает местные особенности рельефа.

Для оценки характеристик селевых потоков в случае повторения катастрофических событий 2015 года были проведены расчеты с учетом современного состояния конуса (рисунок 3). Применялась ЦММ, полученная в ходе обработки снимков с БПЛА по результатам маршрутного обследования долины в августе 2019 г. Также были использованы данные батиметрической съемки озера Барсемкуль, проведенной в 2017 году.

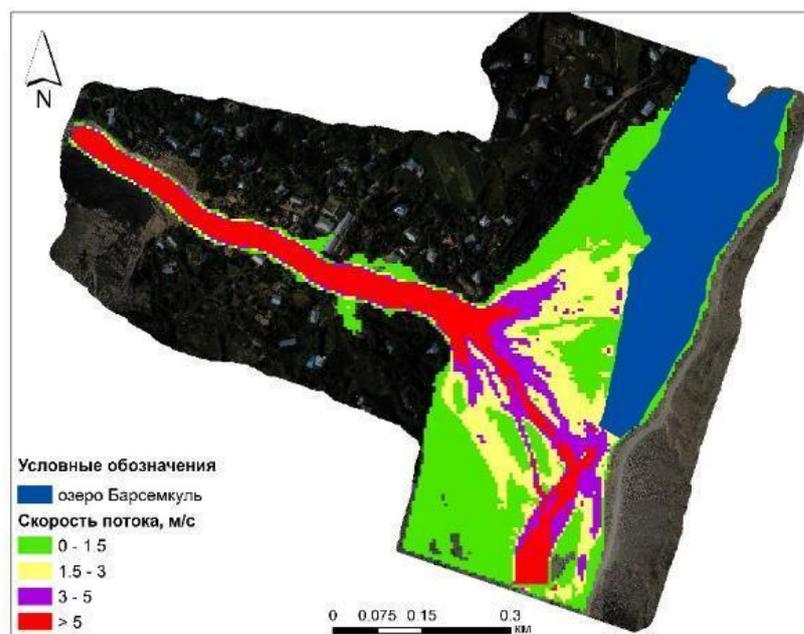


Рисунок 3 – Плановое распределение скоростей потока по результатам моделирования I сценария с использованием данных БПЛА

Входными гидрологическими данными были расходы, полученные по I сценарию с тем же набором параметров. По результатам моделирования поток практически полностью концентрируется в русле реки Барсемдара выше селевого конуса 2015 года, при этом сам конус оказывается затопленным.

Далее были проведены расчеты селевого потока 2015 года по III сценарию без использования транспортно–сдвиговой модели для оценки ее вклада (рисунок 4). По результатам моделирования расход потока на вершине конуса выноса оказался почти в 50 раз меньше оценённого по видео.

Можно говорить о том, что включение транспортно–сдвиговой модели в цепочку моделирования позволяет более корректно оценивать характеристики селевого потока. Также результаты моделирования с использованием рельефа, полученного до катастрофы показали, что транспортно–сдвиговая модель может применяться для оценки потенциальной селевой опасности.

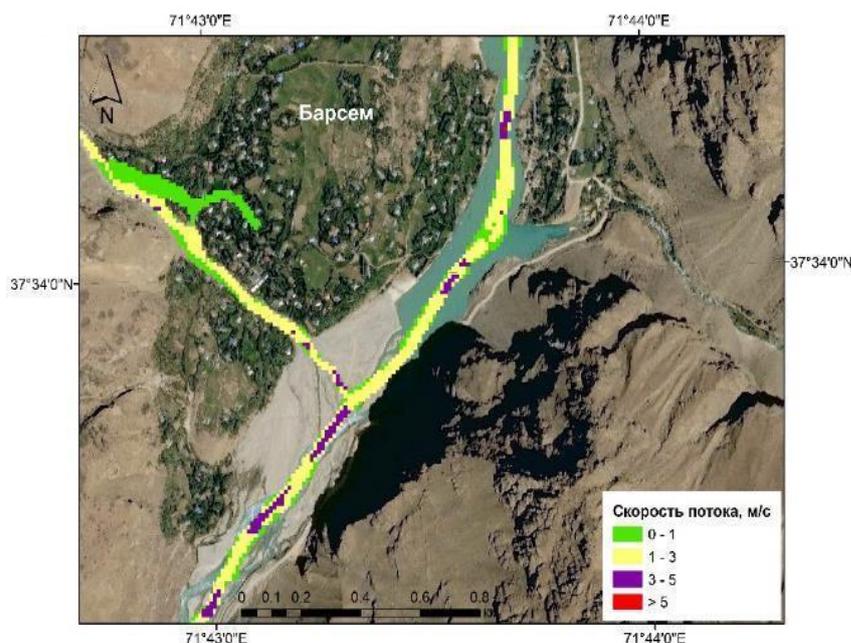


Рисунок 4 – Плановое распределение скоростей потока для селя 2015 года по III сценарию

Глава 5. Моделирование ледниковых селевых потоков

Отличительной особенностью селевых потоков 2000 г. в долине реки Герхожан–Су года явилось катастрофическое врезание русла. Всего в русле помимо основного очага было выделено пять зон подпитки материалом: 1 – основной очаг, 2 – участок между зандрами, 3 – Западный Каньон, 4 – Верхнее ущелье, 5 – Нижнее ущелье, 6 – оползень Бузулган и нижний врез в районе плотины–селеуловителя [Черноморец, 2005]. Моделирование в этих зонах было выполнено с помощью транспортно–сдвиговой модели селеобразования в программе FLOVI. Характеристики селя на участках между зонами рассчитывались по модели FLO–2D. Моделирование проводилось по двум сценариям формирования и прохождения потока: I – грязекаменного, II – наносоводного.

В качестве данных рельефа использовалась топографическая карта 1:25000, отражающая доселевой рельеф в долине.

В транспортно–сдвиговой модели были проведены численные эксперименты с использованием различных параметров потенциального селевого массива. Было выбрано два варианта расчета, для грязекаменного потока и для потоков низкой плотности. В качестве входной гидрологической информации в модели FLO–2D использовались гидрографы, полученные из транспортно–сдвиговой модели.

Объемная концентрация в модели FLO–2D для I сценария (грязекаменного потока), задавалась равной 33%, для II (наносоводного) – 25%. Моделирование проводилось с использованием пяти вариантов параметров селевого блока, указанных в главе 2. Для варианта набора параметров с наибольшими расходами дополнительно были проведены расчеты с объемной концентрацией потока, увеличенной до 40%. По результатам моделирования были получены максимальные расходы селевого потока по каждому из сценариев для всех участков.

Относительная ошибка между максимальным расходом с концентрацией наносов 33% и с максимальным значением, наблюдавшимся 19 июля 2000г., составила 14%. При сравнении рассчитанных расходов при концентрации наносов 33% и со значением расхода в $1356 \text{ м}^3/\text{с}$, полученного по материалам видеосъемки [Божинский и др., 2004], относительная ошибка варьирует в пределах от 4 до 26%. При сравнении полученных значений с расходом в $1764 \text{ м}^3/\text{с}$, полученным по максимальной скорости, относительная погрешность составит от 12 до 22%. Относительная ошибка между расходом, оцененном по минимальной скорости потока, и максимальным рассчитанным расходом с концентрацией 25% составит 8%. Таким образом, была подтверждена возможность использования транспортно–сдвиговой модели для оценки потенциальной селевой опасности в долинах, где селевые очаги пока не перешли в активную стадию развития и показана возможность применения транспортно–сдвиговой модели для оценки характеристик селевого потока на участках подпитки материалом в русле.

Также приводится оценка влияния оползня Бузулган на движение селевых потоков после подвижки в 2020 году. Согласно I сценарию селевой поток образуется в верховьях реки Каяарты–Су. По II сценарию наблюдается подвижка оползня и образования подпрудного озера с высотой плотины в 20 м и его дальнейшим прорывом, по III сценария – в 40 м. Для всех сценариев на участке реки Герхожан–Су вдоль оползня использовалась транспортно–сдвиговая модель. Для I сценария были выбраны параметры потенциального селевого массива на основе данных измерений [Запорожченко, 2002]. Для II и III сценариев были проведены численные эксперименты с заданием различных параметров. Моделирование потока ниже по течению было выполнено с помощью модели FLO–2D. В качестве данных о рельефе использовалась ЦММ, полученная по снимкам с БПЛА, сделанным в сентябре 2020 года через месяц после подвижки

оползня. Однако на тот момент лоток был занесен селевыми отложениями предыдущих потоков, а в 2021 году начались работы по очистке лотка. Полученные результаты воспроизводят наихудший возможный сценарий, когда пропускная способность лотка значительно снижена (рисунок 5).

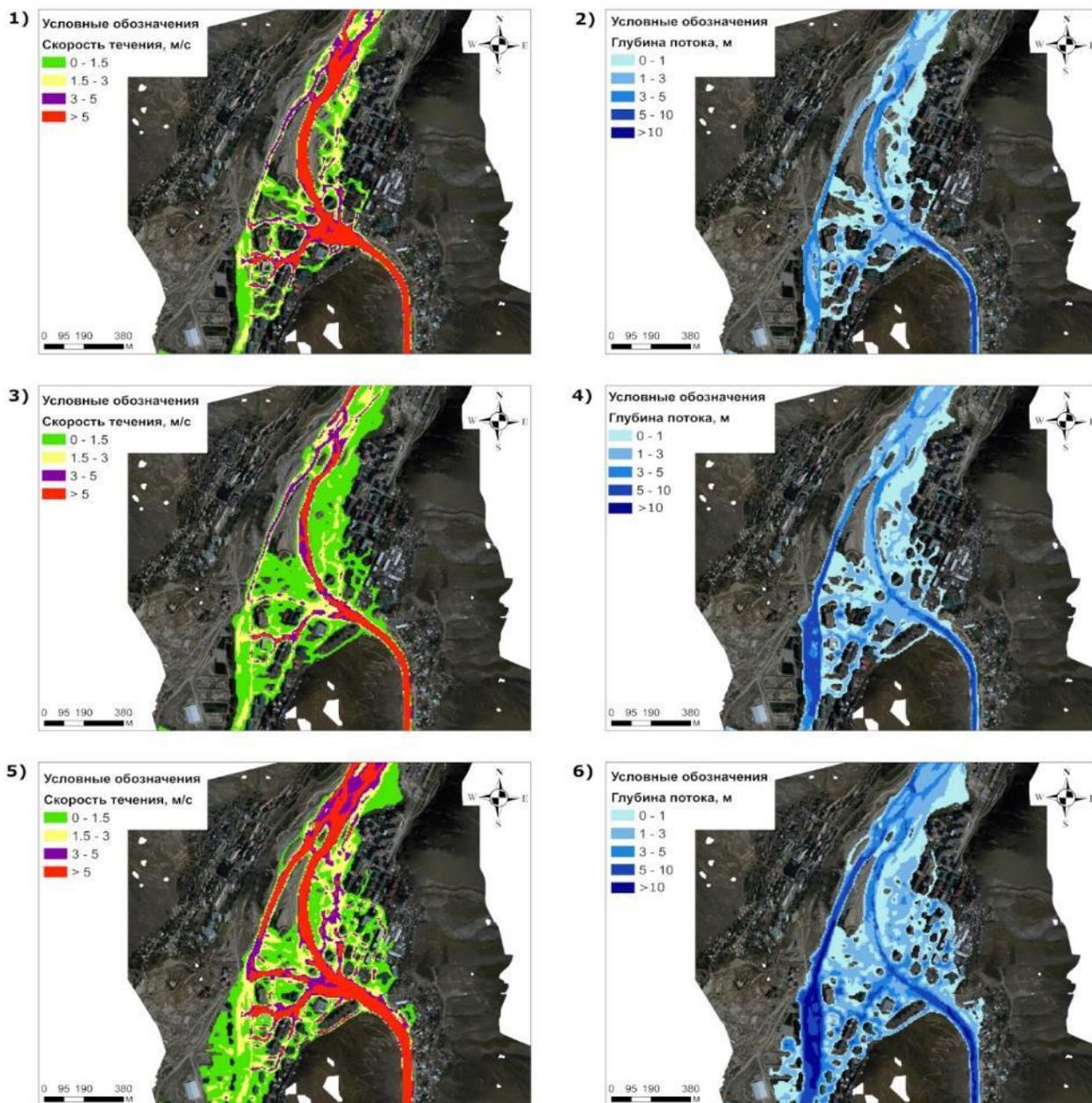


Рисунок 5 – Плановое распределение скоростей для I сценария – 1),2); для II – 3),4); III – 5),6) по результатам моделирования

По результатам моделирования по I сценарию наибольший расход селевого потока был получен по варианту параметров с) и составил $1203 \text{ м}^3/\text{с}$. Разница между вариантами расчета с применением различных параметров реологического блока составила $111 \text{ м}^3/\text{с}$. Наибольшее значение площади зоны затопления

составило 0.323 км^2 , что на 5% больше, чем наименьшее значения. В целом можно говорить, о том, что результаты моделирования по I сценарию попадают в диапазон оценок расходов 2000 года, полученных по видеосъемке.

Моделирование для II сценария проводилось для случаев образования потоков высокой и низкой плотности. Максимальное значение расхода составило $1832 \text{ м}^3/\text{с}$, что выше минимального значения (поток низкой плотности) на $259 \text{ м}^3/\text{с}$. Зона затопления значительно увеличивается, максимальное значение составляет 0.459 км^2 .

Для III сценария на вершине конуса выноса разница между максимальным ($3753 \text{ м}^3/\text{с}$) и минимальным ($3631 \text{ м}^3/\text{с}$) значениями расходов составит $122 \text{ м}^3/\text{с}$. При реализации данного сценария большая часть города Тырнауз окажется в зоне затопления, в том числе левый берег реки Герхожан–Су. Максимальное значение площади зоны затопления наблюдается для наносоводного потока и составляет 0.629 км^2 . Разница между значениями наибольшей и наименьшей площадью затопления составляет 25%.

Глава 6. Моделирование прорывных паводков

Рассматривалось четыре сценария развития возможного прорывного паводка в долине реки Бодомдара. Для I и II сценариев рассматривался прорывной паводок в результате прорыва озера Бодомдара Нижнее. В сценариях III и IV было проведено моделирование в случае каскадного прорыва озер Бодомдара Верхнее и Нижнее в результате перелива или размыва моренной перемычки. Для того, чтобы показать вклад транспортно–сдвиговой модели, во II и IV сценариях расчеты проводились без этой модели, но с использованием остального комплекса. Данные озера ранее не прорывались, поэтому проводилась оценка потенциальной селевой опасности на участках долины.

Согласно I сценарию рассматривается формирование прорывного паводка в результате спуска озера Бодомдара Нижнее с объемом согласно данным батиметрической съемки (328 тыс. м^3). Для расчета гидрографа прорывного паводка использовалась модель прорыва озера. В модели прорыва озера были выполнены численные эксперименты с уменьшением длины канала и увеличением температуры воды в озере. При уменьшении длины канала на 100 м и более будет наблюдаться рост расхода на 7%, эквивалентный увеличению температуры воды в

озере от 0.4°C. Увеличение начальной температуры воды в озере на 1°C приведет к росту максимального расхода на 34 м³/с, то есть на 20%. Далее были проведены численные эксперименты в транспортно–сдвиговой модели с различными вариантами задания исходных данных. Наибольшее влияние, согласно результатам эксперимента, оказывает начальная влажность массива.

В сценарий III рассматривался каскадный прорыв озёр Бодомдара, расход прорывного паводка был оценен по формуле К. Хуггеля и соавторов [Huggel et al., 2004]. Согласно результатам моделирования, при увеличении плотности потенциального селевого массива примерно на 600 кг/м³ будет наблюдаться рост максимального расхода в среднем на 5 % для данного сценария. Самое значительное влияние будет оказывать начальная влажность потенциального массива. Результаты моделирования показывают, что формирование расхода селевого потока определяется значениями уклонов в селевом очаге, но может значительно варьироваться в зависимости от начального состояния потенциального селевого массива. Для оценки параметров, при которых может наблюдаться наибольшее значения пикового расхода в конкретном потенциальном селевом очаге, необходимы дальнейшие исследования. Рельеф для моделирования был построен с использованием цифровой модели рельефа PALSAR с разрешением 12.5 м для долины и данных съемки БПЛА с разрешением ЦММ 1м для конуса.

При использовании транспортно–сдвиговой модели на вершине конуса выноса при сценарии прорыва озера Бодомдара Нижнее расход потока будет выше на 77%, при каскадном прорывном паводке на 98% (рисунок 6).

В долине реки Бодомдара при прохождении прорывного паводка будут наблюдаться наибольшие глубины и скорости потока. Для сценариев I и II, в которых рассматривается прорыв озера Бодомдара Нижнее, разница между площадями затопления составит 22%. При рассмотрении сценариев каскадного прорывного паводка III и IV разница в площадях затопления равняется 14%. Однако устьевой конус реки Бодомдара и участок поймы реки Шахдара, где произойдет затопление территории (рисунок 6), в настоящее время освоены незначительно.

В русле реки Шахдара ниже конуса выноса реки Бодомдара разница в расходах потока составит 37%, ниже конуса выноса реки Дашт – 33%, в устьевой области реки Шахдара – 35%. Зона затопления в русле реки Шахдара для III сценария с

использованием транспортно–сдвиговой модели оказывается на от 5 до 9% больше, чем для сценария IV без данной модели.

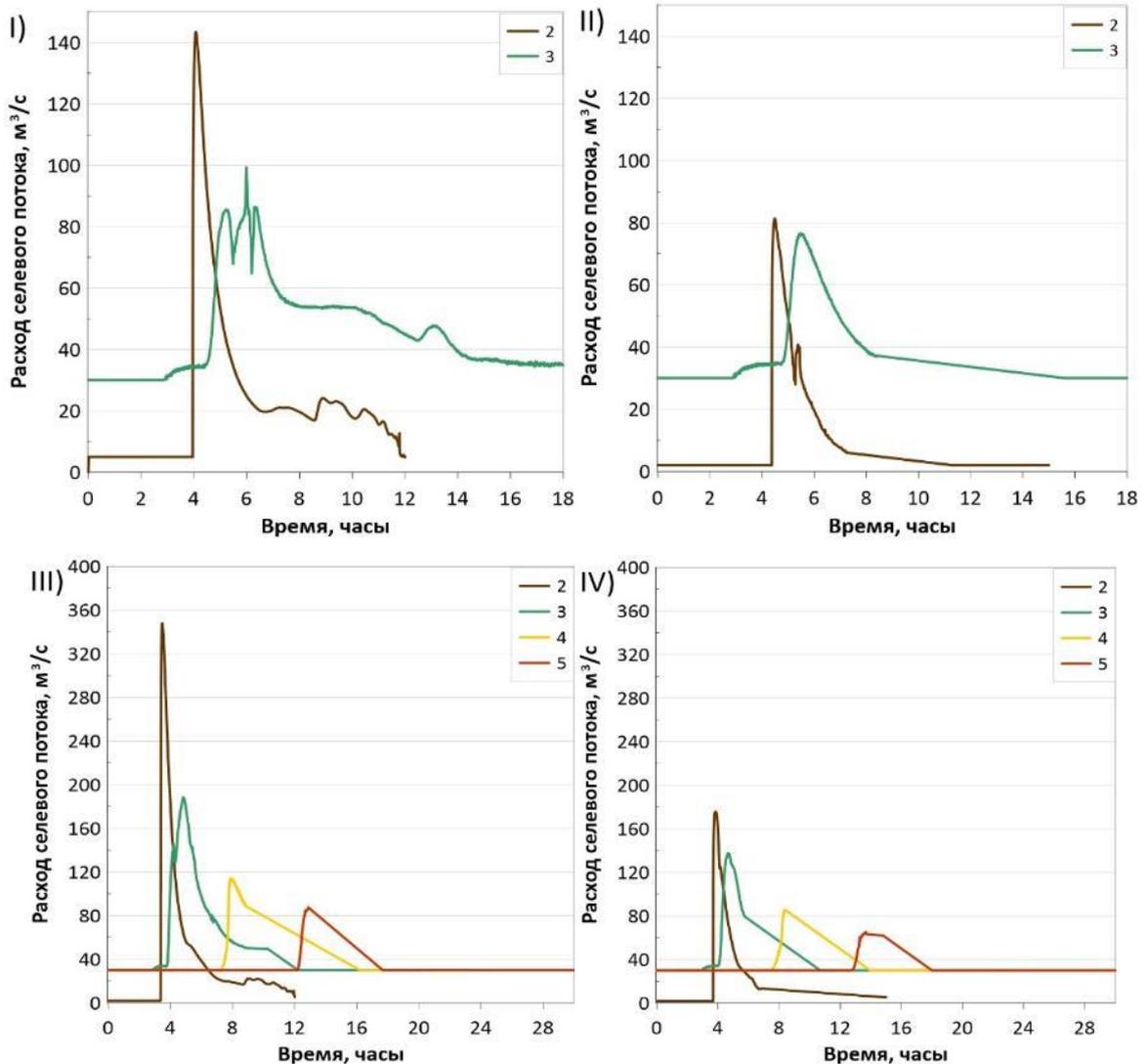


Рисунок 6 – Гидрографы прорывного паводка, полученные по результатам моделирования: 1 – на выходе из потенциального очага, 2 – вершина конуса реки Бодомдара, 3 – река Шахдара ниже конуса реки Бодомдара, 4 – река Шахдара ниже конуса реки Дашт, 5 – река Шахдара у впадения в реку Гунт

Глава 7. Анализ применимости комплекса моделей

В данной главе приведен анализ особенностей используемого комплекса моделей для различных типов природных объектов, показаны наиболее значимые параметры каждого моделируемого процесса и даны рекомендации по их мониторингу. Так, для модели прорыва озера начальная температура воды в озере является одним из параметров, к которым она наиболее чувствительна. В связи с

этим для моделирования прорывного паводка в случае отсутствия измерений начальную температуру воды в озере можно задавать в пределах от 0 и до 4°C. В каждом конкретном случае следует учитывать высоту расположения озера, близость ледников, а также распределение глубин в озере.

В *транспортно–сдвиговой модели* особенности зоны формирования потока учитываются только путем задания уклона и ширины потока, а также параметров потенциального селевого массива, таких как начальная влажность, плотность и угол внутреннего трения. В работе показано, как данная модель используется для расчетов снеговых и ледниковых селевых потоков. В связи с тем, что потенциальный селевой массив представляет собой грубообломочный материал с тонкодисперсным заполнителем, определять необходимые для моделирования параметры достаточно затруднительно. Результаты моделирования демонстрируют, что при прочих равных условиях начальная влажность потенциального селевого массива оказывает наибольшее влияние на значение максимального рассчитанного расхода селея. Так, значение расхода для варианта массива, полностью заполненного водой, может быть выше почти в 16 раз, чем для абсолютно сухого. Вклад угла внутреннего трения при его изменении на 5° в формировании максимального расхода при низкой начальной влажности незначителен и составляет от 1 до 8%. При увеличении влажности разница в расходах для вариантов, где УГВТ изменяется на 5°, составит от 10 до 50%. Изменение плотности массива на 600 кг/м³ может привести к росту расхода примерно от 2 до 9%, в среднем примерно на 5%. Изменение плотности на 1000 кг/м³ дает увеличение расхода примерно на 18%. В данной работе моделирование велось для трех возможных ситуаций: абсолютно сухого массива, увлажненного до предела текучести и заполненного водой. В отсутствие каких–либо измерений параметров селевого массива, для первичной оценки селевой опасности можно рекомендовать проводить расчеты для абсолютно сухого массива. Далее в качестве численных экспериментов можно использовать пограничные значения влажности, представленные в данной работе. Также можно рекомендовать при проведении

полевых работ определять полную влагоемкость массива, при которой возможно формирование максимального расхода селевого потока.

Также в случае, если имеются данные наблюдений, можно провести оценку наиболее подходящих параметров потенциального селевого массива по результатам численных экспериментов. Например, для селевого потока 2015 года в русле реки Барсемдара (ГБАО, Таджикистан) имелось большое количество видеоматериалов катастрофы. Автором была проведена обработка данных видеосъемки, которая включала в себя оценку скорости потока и расхода волны. Вариант задания параметров, по которому был получен максимальный расхода в транспортно–сдвиговой модели, выбирался как наиболее близкий к оценке по видеосъемке.

Полученный по транспортно–сдвиговой модели гидрограф селевой волны применялся в качестве входных данных для *гидродинамической модели FLO–2D*. Для использования селевого блока в модели необходимо задавать реологические параметры, такие как напряжение пластического трения и вязкость потока. В случае, если отсутствуют измерения данных параметров, авторы модели предлагают использовать значения, определенные для бассейнов рек в Скалистых горах штата Колорадо возле городов Аспен и Гленвуд–Спрингс. Наибольшая разница между максимальными расходами наблюдается при задании нескольких селевых волн. Границы площадей затопления также значительно варьируются в зависимости от параметров селевого блока. Таким образом, для каждого объекта в случае отсутствия данных измерений параметров в самом бассейне или же аналогичном ему следует проводить расчеты с различными значениями параметров селевого блока. Также при выборе параметров можно опираться на гранулометрический состав отложений, на основе которых авторами модели [O'Brien, Julien, 1988] были получены реологические параметры.

Важной особенностью данной работы является использование комплекса моделей для оценки характеристик селевых потоков и прорывных паводков. На примере реки Барсемдара было показано, в гидродинамической модели FLO–2D не учитывается эрозия потока, а также процессы, происходящие при формировании селевого потока в очаге. Для долины реки Барсемдара величина рассчитанного расхода оказывается меньше оцененного по видеоматериалам примерно на 98%.

Для прорывного паводка в долине реки Бодомдара, разница в расходах для сценариев, где применялась транспортно–сдвиговая модель или отсутствовала, составила от 77 до 98%. Также в работе была продемонстрирована возможность оценки селевого расхода в программе FLOVI для потенциальных селевых очагов. Так, для моделирование селевого потока 2015 года в долине реки Барсемдара и 2000 года для долины реки Герхожан–Су использовался рельеф, полученный по съемкам до катастроф. Для долины реки Герхожан–Су относительная ошибка между оценёнными на конусе и рассчитанными расходами на вершине конуса составила от 4 до 22% при том, что не все волны были сняты на видео. Для долины реки Барсемдара разница в рассчитанных расходах на вершине конуса выноса и оценённых по видеосъемке в устье реки составила 3 от до 115% в зависимости от параметров модели FLO–2D.

Моделирование на конусах выносах всех исследуемых рек проводилось с использованием данных БПЛА, что значительно повысило детальность и достоверность полученных оценок зон затопления. Для всех исследуемых объектов впервые были получены карты пространственного распределения скоростей потока, глубин для разных сценариев расчета и вариантов задания начальных параметров. Данные карты могут быть использованы местными органами власти для оценки зон затопления при планировании развития населенных пунктов на конусах выносах изучаемых рек.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность использования предложенного комплекса моделей для оценки характеристик как прорывных паводков, так и селевых потоков. Таким образом, можно рекомендовать использование данного комплекса для оценки селевой опасности территории. В завершении 7 главы даны рекомендации по снижению возможных ущербов от селевой опасности для каждого из исследуемых объектов.

В заключении, согласно цели данного исследования и защищаемым положениям, были сделаны следующие выводы:

1. На настоящий момент разработано большое количество математических моделей, при этом ни одна из них не учитывает комплексно все процессы, происходящие при образовании прорывного паводка и формировании селевого потока в очаге. В рамках данной работы была создана компьютерная

программа FLOVI на языке программирования Python. Данная программа объединяет в себе уравнения модели прорыва озера и модернизированной автором модели транспортно–сдвигового селеобразования.

2. Для объектов (долины рек Барсемдара, Бодомдара, Герхожан–Су) впервые был применен комплекс моделей (модель прорыва озера, транспортно–сдвиговая и FLO–2D) и получены карты пространственного распределения глубины, скорости потока и границы зоны затопления на конусах выносах для различных сценариев.
3. По результатам численных экспериментов в моделях были выявлены определяющие параметры, изменение которых приводит к большим вариациям значений максимальных расходов и площадей затопления. Модель прорыва озера имеет наибольшую чувствительность к начальной температуре воды, транспортно–сдвиговая – к влажности потенциального селевого массива, FLO–2D – к реологическим параметрам (вязкости и напряжения пластического трения).
4. Модель прорыва озера, разработанная для озер с ледяной плотиной, впервые применялась для озер, подпруженных мореной с ледяным ядром, для сценариев прорыва озера по подледниковым каналам стока.
5. Созданная программа FLOVI применялась как одна из моделей в комплексе расчетов. Использование рассчитанного гидрографа селевой волны из FLOVI как входного в модели FLO–2D позволило получать более близкие к наблюдаемым значениям значения расходов потока, глубин и скоростей. Разница в максимальных расходах по сценариям, где программа применялась или не использовалась, могла достигать десятков раз.
6. Была показана возможность использования транспортно–сдвиговой модели для оценки потенциальной селевой опасности в долинах, где селевые очаги еще не перешли в активную стадию развития, ранее такие расчеты не проводились.

7. Транспортно–сдвиговая модель применялась не только для селевого очага, но также и на участках дополнительного набора рыхлообломочного материала в руслах рек, ранее модель для таких участков не использовалась.
8. Данные видеоматериалов в случае отсутствия данных иных наблюдений могут быть использованы в качестве прямой оценки скорости селевого потока для калибровки и верификации моделей. Определение данной динамической характеристики потока является одним из важнейших вопросов, как научных исследованиях, так и в проектно–изыскательных работах.
9. Предложенный комплекс моделей позволяет улучшить оценку характеристик селевых потоков и прорывных паводков.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.6.16:

1. **Куровская (Юдина) В.А.**, Черноморец С.С., Крыленко И.Н., Виноградова Т.А., Докукин М.Д., Запорожченко Э.В. Сход оползня Бузулган: моделирование селей по реке Герхожан–Су и сценарии их воздействия на город Тырнауз после произошедших в 2020 году изменений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 1. С. 43–53 (WoS, Scopus, IF (CiteScore) = 1.5).
2. **Юдина В.А.**, Черноморец С.С., Виноградова Т.А., Крыленко И.Н. Моделирование селевых потоков снегового генезиса на примере реки Барсемдара, Таджикистан // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 3. С. 51–63 (WoS, Scopus, IF (CiteScore) = 1.1).
3. **Kurovskaja (Iudina) V.A.**, Chernomorets S.S., Vinogradova T.A., Krylenko I.N., Gulomaydarov A.G., Raimbekov Y.K. Scenarios calculations of outburst flood and debris flows // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 834. DOI: 10.1088/1755–1315/834/1/012009 (WoS, Scopus, IF (CiteScore) = 0.45).

4. Кидяева В.М., Крыленко И.В., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., **Куровская (Юдина) В.А.**, Раимбеков Ю.Х., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О. Реакция высокогорных озер западного Памира на изменение климата (на примере озера Варшезкуль Нижнее, Горно–Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 3. С. 90–104 (Scopus, IF (CiteScore) = 0.70).

Иные публикации:

6 работ в других рецензируемых журналах, сборниках тезисов и материалов российских и международных конференций. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/profile/KurovskaiaV/>.