

УДК 556.072, 551.311.21 (234.9)

А.Н. Божинский, Э.В. Запорожченко, С.С. Черноморец

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СЕЛЕЙ В БАССЕЙНЕ Р. КУЛЛУМКОЛ-СУ (КАВКАЗ)¹

Введение. Селевые потоки на Кавказе — явление нередкое. Как правило, ежегодно сели формируются в нескольких бассейнах, но не повсеместно. Явление массового схода селей характерно для горных стран тропических районов — Центральной Америки, Антильских островов, Южного Китая, Тайваня, Филиппин и др. [15]. Обычно массовый сход селей связан с прохождением тайфунов, когда количество осадков достигает сотен миллиметров в течение нескольких дней. Все эти сели по происхождению жидкой составляющей относятся к типу ливневых. На Кавказе, в области умеренного климата, массовый сход ливневых селей более редок и случается несколько раз в столетие [11], так было в 1953, 1967, 2002 гг.

Наиболее катастрофическими последствиями на Кавказе отличаются сели гляциального генезиса. Гляциальные сели сходят довольно редко, причем чаще всего только в одном селевом бассейне. Так, гляциальные сели в верховьях р. Каяарты-Су в 2000 г., на р. Малке в 2006 г. [13, 14] не сопровождалась образованием селей в других долинах. Это подчеркивает индивидуальность селеобразования в гляциальных очагах. Однако изредка случаются такие события, как массовые сходы селей с участием ледников. Эти сели имеют смешанный — гляциоливневый генезис. Классической селеопасной ситуацией в приледниковой зоне Кавказа является длительный жаркий период в середине лета, который сменяется сильным ливнем, охватывающим значительную часть района. Таким было событие 19 июля 1983 г. В этот день в высокогорных районах Кабардино-Балкарии сели отмечены в 80% бассейнов с современным оледенением [10]. По краям ледников на Кавказе селевые потоки прошли по периферии ледников в долинах р. Чегем и его притоков (Сарын-Су и др.), Каяарты-Су, Гарабаши, притоков Адыр-Су (Джаловчат, Куллумкол-Су, Суллукол-Су) и в нескольких десятках других долин.

Проблема исследования гляциоливневых селей. Характеристики гляциоливневых селей изучены недостаточно. Между тем при оценке селевой опасности и проектировании защитных мероприятий необходимо иметь представление о разбросе значений основных характеристик селей. В связи с этим в качестве инструмента для изучения зарождения и трансформации гляцио-ливневых селей целесообразно использовать математическое моделирование. Для примера выбран случай с наиболее детально изученными

характеристиками селя и со значительной величиной ущерба: селевой поток 1983 г. в долине р. Куллумкол-Су, разрушивший альплагерь Джайлык.

Арена событий. Река Куллумкол-Су (рис. 1) — это правый приток р. Адыр-Су, которая в свою очередь является правым притоком р. Баксан. Водораздел бассейна р. Куллумкол-Су проходит по хр. Адыр-Су и его отрогам. Основные вершины водораздела — пики Куллумкол-Баши, Тютю-Баши (4404 м), Джайлык (наивысшая точка бассейна, 4404 м), Юном-Каратау, Ору-Баши, Адыр-Су, Химик. Для бассейна реки характерно развитое оледенение. Долина реки имеет ступенчатый продольный профиль, что связано с наличием конечно-моренных валов. Селевые очаги приурочены к зоне пересечения активных тектонических разломов [10]. Селевые потоки в долине р. Куллумкол-Су зафиксированы в 1958, 1961, 1973, 1975, 1977, 1983 и 1986 гг. [6, 7]. И.Б. Сейнова [11] также приводит сведения о селях в 1911, 1936, 1940, 1953, 1958, 1966, 1979, 1980 гг. Все значительные сели в долине до сих пор зарождались на склоне морены ледника Западный Тютю. Водоток, начинающийся от ледника, впадает в р. Куллумкол-Су справа. С 1949 г. на конусе выноса р. Куллумкол-Су существовал один из лучших альплагерей Советского Союза — Джайлык. В связи с селевой опасностью для альплагеря проводилось проектирование селезащитной стенки [8], но строительство ее до 1983 г. не началось.

Во второй декаде июля 1983 г. на Центральном Кавказе стояла экстремально жаркая погода, причем в ночное время нулевая изотерма находилась выше ледниковых языков. Среднесуточная температура воздуха на метеостанции Терскол на 5–7°C превышала среднемесячное значение [11]. Незадолго до катастрофы (16 июля) был зафиксирован сель-предвестник. Были организованы наблюдения на морене ледника Западный Тютю, в зоне потенциального зарождения селя. По радиосвязи информация о состоянии очага передавалась руководству альплагеря [7]. Основные результаты предкатастрофической подготовки селя — накопление воды в льдонасыщенной морене, нарушение сплошности и потеря устойчивости моренного массива, а также значительные расходы воды в ручье, вытекавшем из-под ледника. Катастрофическое развитие процесса началось после ливня в ночь с 18 на 19 июля, послужившего спусковым механизмом.

Селевая катастрофа и уничтожение альплагеря. Ход катастрофы рассмотрен в ряде публикаций [5–7,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05–05–64037, 07–05–00172, 06–05–64787) и программы "Science for Peace" (грант № 982143).



Рис. 1. Русло р. Куллумкол-Су с селевыми валами 1983 г. Стрелка показывает направление движения селей. Фото С.С. Черноморца, 2002 г.

9]. По данным метеостанции Терскол, в течение ливневого ночного дождя выпало 36,4 мм осадков [11]. В 5 ч 20 мин началось массовое обрушение стенок селевого желоба. К 6 ч 19 июля селя достиг р. Куллумкол-Су. В результате селя сформировался новый врез, не существовавший ранее; 19 июля в течение 6,5 ч сошли 6 селевых волн, последняя из которых завершила разрушение альплагеря. Время добегания волн от воронки зарождения до р. Куллумкол-Су (2250 м) составляло минимум 8–10 мин, а затем от р. Куллумкол-Су до вершины конуса выноса (1900 м) — 4–11 мин. Проходили как водокаменные, так и высокоплотные грязекаменные сели. К вечеру 19 июля селевой желоб уже имел ширину 35–40 и глубину 35–40 м в точке зарождения. Ниже глубина уменьшилась до 10, а затем до 5 м. В средней трети вреза вскрылось коренное ложе.

Объем селевой массы, отложившейся на конусе выноса в районе альплагеря Джайлык, по расчетам, составил 330 тыс. м³, суммарный объем выноса в твердой фазе — 620 тыс. м³. Средняя мощность отложений на конусе выноса — 2,5 м, максимальная — 7 м. Скорость селя при выходе на конус выноса равнялась в среднем 5 м/с. Плотность селевой массы в потоке в этой точке достигала примерно 2,1–2,2 т/м³. Повторяемость катастрофического селя 1983 г. оценивалась по фитоиндикационным признакам, как один раз в 500–1000 лет [6].

Длина пути селя от точки зарождения до точки остановки фронта твердого материала составила примерно 3,7 км. Основная часть альплагеря была уничтожена. Благодаря своевременному оповещению из 240 человек, находившихся в лагере, никто не пострадал. Альплагерь впоследствии был восстановлен в другом месте.

Моделирование. Моделирование возможных катастрофических селевых потоков в долине р. Куллумкол-Су проводилось с использованием двухфазной модели [3], в которой учитывается раздельное движение фаз: вода (*w*), твердые включения (*s*) и их взаимодействие. Двухфазная модель позволяет описать

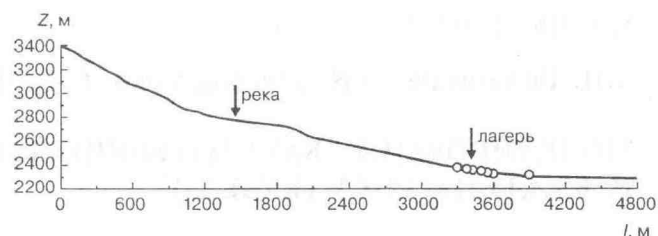


Рис. 2. Продольный профиль пути схода селевого потока. Светлые кружки отвечают профилю ответвления в сторону альплагеря Джайлык; *Z* — абсолютная высота, *l* — расстояние по горизонтали

распад селевого потока в стадии торможения и отложения твердого материала. Модель является одномерной гидравлического типа. Предполагается, что давление в потоке распределено по гидростатическому закону. Значения плотности твердой и жидкой фаз потока принимали постоянными. Взаимодействие между фазами в потоке определяется вязким трением, пропорциональным разности скоростей фаз. В модели учитывается кулоново трение слоя твердого материала о ложе русла и турбулентное трение для слоя воды. Кроме того, принимается во внимание приток массы твердого материала при эрозии русла, приток воды на “хвосте” потока и боковой приток воды (впадение реки). Двухфазность потока и вовлечение новых масс в движение определяют преимущество такой модели. Ранее модель применялась для описания катастрофического селевого потока в г. Тырныаузе в 2000 г. [1]. Однако непосредственное приложение модели к описанию селевого процесса в р. Куллумкол-Су имеет особенности.

Селевой поток зародился ниже края морены ледника Западный Тютю и далее двигался по сухому старому руслу до реки (отметка на профиле от точки зарождения по длине пути $l = 1400$ м, рис. 2). Эта стадия движения селя характеризуется весьма сильной эрозией русла и относительно малым объемом жидкой фазы. Затем значительные объемы твердого материала, привнесенного в реку, преобразовывались в селевые валы, распространявшиеся вниз по реке. Вторая стадия селевого процесса отличается слабой эрозией русла реки и мощными валами. Очевидно, описать такой сложный процесс в целом с помощью единой модели нереально. В связи с этим сначала моделировалось движение селевого потока от момента зарождения до попадания головной части селя в реку. На этой стадии использовались высокие значения коэффициента сухого трения и коэффициента вовлечения твердого материала.

Результаты и обсуждение. Результаты расчета эрозии русла приведены на рис. 3, на котором видно, что после прохождения 6 волн, зафиксированных 19 июля 1983 г., глубина желоба может понизиться на 30 м и более. В то же время эрозия русла реки незначительна. Кроме того, имеется скальный участок русла, где эрозия практически отсутствует. Далее моделировалось движение селевого потока по реке. При этом в качестве начального объема твердого материала принимался объем головной части селя, привнесенный в

реку со склона. Величина этого объема составляла примерно 70% объема селевого потока. Иными словами, хвостовая часть модельного селевого потока со склона отсекалась. В качестве начальной скорости движения массы твердого материала в реке принималась скорость, с которой этот материал был привнесен в реку. Таким образом, первая и вторая стадии движения селевого потока мгновенно сопрягались. Движение селевого потока в реке моделировалось с использованием меньших коэффициентов трения и коэффициента вовлечения твердого материала.

Поскольку значения входных параметров модели известны плохо, было проведено статистическое моделирование методом Монте-Карло [4, 12] движения селевого потока по руслу р. Куллумкол-Су. Четыре параметра двухфазной модели селевого потока полагаются случайными: угол кулоновского трения влажного твердого материала о ложе русла (ψ_{wet}), коэффициент турбулентного трения жидкой фазы (k_{wt}), глубина реки (H_w) и толщина слоя твердого рыхлообломочного материала (H_s), привнесенного в реку. Поскольку истинные распределения случайных параметров модели неизвестны, предполагалось, что все четыре параметра распределены по нормальному закону в следующих интервалах: $7,5^\circ \leq \psi_{wet} \leq 10,5^\circ$; $0,025 \leq k_{wt} \leq 0,055$; $0,7 \leq H_w \leq 2$ м; $3 \leq H_s \leq 6$ м. Остальные параметры модели были детерминированными. Толщина потенциально эродируемого слоя для одной селевой волны принималась постоянной по длине русла и равнялась $H_e = 10$ м, коэффициент вовлечения твердого материала (m_e) оставлял 0,0005, интенсивность притока жидкой фазы (Q_{tail}) на "хвосте" потока (расход на единицу площади в начальном створе, $l = 1400$ м) была принята равной 1 м/с. Боковые притоки жидкой фазы в модели отсутствовали. Коэффициент объемной концентрации (плотность упаковки) твердого материала в потоке (α_s) был равен 0,5. Плотность масс рыхлообломочного материала и воды составляла 2700 и 1000 кг/м³ соответственно. Статистическое моделирование динамики селевого потока проводилось для створа $l = 3600$ м, соответствующего альплагерю Джайлык.

На рис. 4 показана головная часть селевого потока при достижении его фронтом альплагеря. Видно, что слои твердой и жидкой фаз движутся почти синхронно. Расчеты показали, что в большинстве случаев фронт твердой фазы движется несколько впереди фронта жидкой фазы, однако в случае сильного торможения слоя твердой фазы при подходе к створу фронт жидкой фазы опережает фронт твердой фазы. Головная часть селевого потока представляет собой вал водно-каменной смеси, перемещающийся по руслу. Как видно на рис. 3, характерная длина вала составляет около 150–200 м.

При статистическом моделировании разыгрывались 200 случайных значений четырех параметров модели в интервалах их нормального распределения.

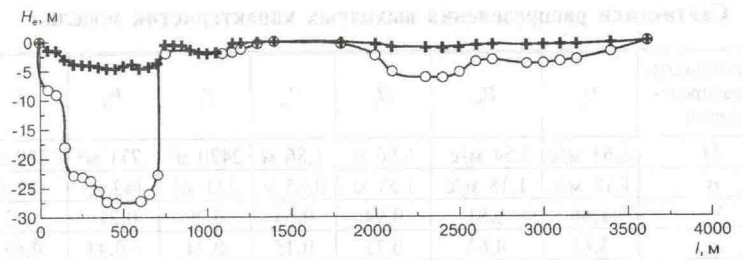


Рис. 3. Глубина эрозионного вреза, созданного селевым потоком. Крестики — эрозия после прохождения одной волны, кружки — эрозия после прохождения 6 волн

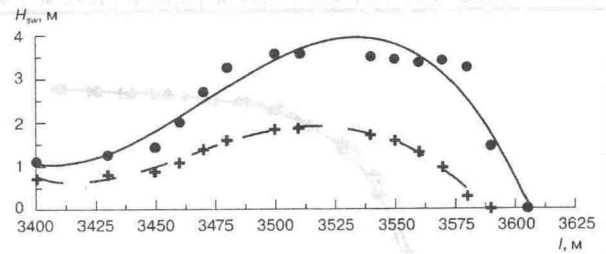


Рис. 4. Типичная головная часть селевого потока; кружки — слой твердой фазы, крестики — слой жидкой фазы

Для каждого из случайных наборов параметров решались уравнения модели движения селевого потока. Таким образом, в результате статистического моделирования на выходе модели получались 200-точечные ряды 7 выходных динамических характеристик в створе: скорости (U), максимальных глубин (H) и погонных (на единицу ширины русла) объемов (V) слоев твердой и жидкой фаз потока, а также времени (T) прихода фронта потока в створ.

С использованием полученных рядов были определены основные статистики распределений выходных характеристик модели. В таблице представлены оценки математического ожидания (M), среднеквадратического отклонения (σ), коэффициентов асимметрии (λ_a), эксцесса (λ_e) и коэффициента вариации (C_v), а также максимальных (max) и минимальных (min) значений выходных характеристик.

Приведенные в таблице статистики распределений показывают, что распределения объемов твердой и жидкой фаз характеризуются малыми коэффициентами асимметрии и эксцесса и близки к нормальным распределениям. В то же время распределения скоростей фаз, толщин слоев и времени прихода фронта потока в створ характеризуются значительными положительными коэффициентами асимметрии и эксцесса. Иными словами, мода распределений сдвинута влево, а "хвост" вправо, и распределения островершинные. На рис. 5 приведены графики функций распределения скоростей слоев твердой и жидкой фаз, которые почти совпадают. Знание скоростей, равно как и высоты переднего фронта селевого потока, важно для оценки возможного давления на сооружение, поскольку величина давления пропорциональна квадрату скорости потока [2]. Отметим, что функция распределения скорости переднего фронта при больших значениях скоростей сильно выполаживается, поэтому значения $U \sim 6$ м/с и выше можно считать

Статистики распределения выходных характеристик модели

Характеристики распределений	U_s	U_w	H_s	H_w	V_s	V_w	T
M	3,64 м/с	3,54 м/с	6,06 м	1,86 м	2470 м ²	771 м ²	309 с
σ	1,18 м/с	1,18 м/с	1,87 м	0,65 м	331 м ²	142 м ²	118 с
λ_a	1,46	1,81	0,94	0,55	0,20	0,21	1,13
λ_c	3,82	4,63	0,75	0,15	0,34	-0,41	0,65
C_v	0,32	0,33	0,31	0,35	0,13	0,18	0,38
max	9,08 м/с	9,18 м/с	13,4 м	4,08 м	3520 м ²	1225 м ²	683 с
min	0,95 м/с	1,81 м/с	3,54 м	0,62 м	1542 м ²	497 м ²	136 с

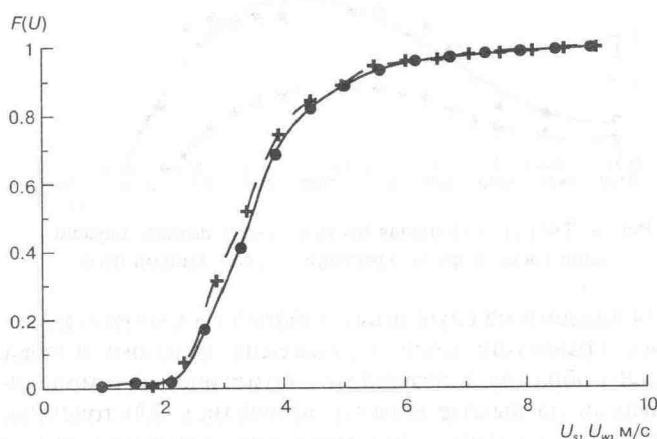


Рис. 5. Функции распределения скоростей переднего фронта селевого потока; кружки — твердая фаза, крестики — жидкая фаза

экстремальными. При таких значениях скорости расчетное давление селевого потока на стенку [2] составляет $3,6 \cdot 10^4$ Па, что может привести к значительным разрушениям. Экстремальные погонные объемы твердого материала составляют $3,5 \cdot 10^3$ м². Если учесть, что, по наблюдениям, ширина валов селевого потока была 50—60 м [6], то получим объем около $210 \cdot 10^3$ м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Божинский А.Н., Виноградова Н.Н., Крыленко И.В. Математическая модель катастрофического селевого потока 2000 г. в г. Тырнаузе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2004. № 5. С. 22—27.
2. Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л., 1987.
3. Божинский А.Н., Назаров А.Н. Динамика двухфазного селевого потока // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1999. № 5. С. 15—20.
4. Божинский А.Н., Назаров А.Н., Черноус П.А. Вероятностная модель движения снежных лавин // Там же. 2000. № 5. С. 8-12.
5. Громов В.А., Кайнер В.Д. Опыт определения максимального селевого выброса в бассейне р. Куллумкол-Су (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата, 1984. С. 209—215.
6. Запорожченко Э.В. Необычный сель на р. Куллумкол-Су // Метеорология и гидрология. 1985. № 12. С. 102—108.
7. Запорожченко Э.В. Старый Джайлык умер — да здравствует новый! (История гибели и восстановления гла-

Результаты статистического моделирования в основном согласуются с данными природных наблюдений. Так, фактическое углубление желоба при движении селевого потока по склону достигало 35—40 м. Протяженность селевых валов была ~100 м. Характерное время добега волн катастрофического селевого потока от впадения в р. Куллумкол-Су до альплагеря составляло от 4 до 11 мин [6], тогда как, согласно расчетным данным (таблица), время добега колебалось в пределах 2,5—11,5 мин.

Заключение. Сель на р. Куллумкол-Су — наиболее детально изученный пример из событий 19 июля 1983 г. Хотя подобная ситуация на Кавказе возникала не очень часто, но в связи с продолжающейся деградацией оледенения такие события могут участиться. Так, в будущем в долине р. Куллумкол-Су возможно формирование нового крупного селя, источником жидкой составляющей которого может стать, например, Кичкидарское озеро недалеко от конца ледника Юном. Имеется потенциальная угроза и для ряда других долин приледниковой зоны. В настоящее время для кавказского высокогорья рассматриваются масштабные инфраструктурные проекты по строительству горнолыжно-туристических комплексов, гидроэлектростанций, автодорог. В зоне возможной селевой опасности могут оказаться не только существующие, но и проектируемые объекты. Моделирование позволяет рассчитывать возможные диапазоны характеристик гляцио-ливневых селей в подобных условиях и принимать обоснованные решения при проектировании селезащитных мероприятий.

8. Запорожченко Э.В., Кайнер В.Д. Селеносность р. Куллумкол-Су и мероприятия по защите альпинистского лагеря Джайлык // Инженерные изыскания в строительстве. Сер. XV. 1978. Вып. 5 (70). С. 52—55.
9. Кайнер В.Д., Громов В.А. Инженерно-геологические особенности селеформирования в бассейне р. Куллумкол-Су (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата, 1984. С. 202—208.
10. Сейнова И.Б. Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). Деп. ВИНТИ № 9763-В97, 1997.
11. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). М., 2001.
12. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М., 1968.
13. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М., 2005.

14. *Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В.* Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // *Материалы гляциологических исследований*. 2007. Вып. 102. С. 211–215.

Научно-исследовательская лаборатория
снежных лавин и селей, Институт Севкавказпроводхоз

15. *Jacob M., Hungr O.* Debris-flow hazards and related phenomena. Chichester, 2005.

Поступила в редакцию
26.11.2007

A.N. Bozhinsky, E.V. Zaporozhchenko, S.S. Chernomorets

SIMULATION OF CATASTROPHIC MUD-FLOWS IN THE KULLUMKOL-SU RIVER BASIN (THE CAUCASUS)

A catastrophic mudflow of glacial-storm genesis which occurred in July 1883 in the Kullumkol-Su River valley (the Caucasus) and destroyed the Dzhailyk alpinist camp has been simulated using the two-phase model which accounts for both separate movement of water and solid matter and their interaction. Values of dynamic parameters of the flow were calculated for the camp cross-section and the potential erosion of the mudflow channel was estimated. The Monte-Carlo method was used for the probabilistic assessment of dynamic characteristics of the flow and parameters of mudflow sediments. It is the statistical modeling that makes it possible to calculate variable parameters of such glacial-storm mudflow and support the decision-making on the design of protecting measures.