

Моделирование казбекских ледниковых завалов XVIII–XIX веков

А.Н. Божинский, С.С. Черноморец

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Проведено моделирование «казбекских завалов», в результате которых в XVIII–XIX вв. массы, оторвавшиеся от языка Девдоракского ледника, перекрывали долину р. Терек.

Введение

Девдоракский ледник (Центральный Кавказ) известен тем, что в XVIII–XIX вв. здесь неоднократно происходили катастрофы, известные под названием «казбекские завалы», когда отрывалась часть языка ледника и быстро перемещалась вниз по долине рек Амилишка и Кабахи, а затем перекрывала долину р. Терек. В результате на длительный период прерывалось сообщение по Военно-Грузинской дороге, которая в начале XIX в. была единственной транспортной линией, соединявшей Россию с ее провинциями в Закавказье. Геналдонская катастрофа 2002 г. на леднике Колка в Северной Осетии, расположенном в нескольких километрах от Девдоракского ледника, заставила вновь обратить внимание на Девдоракский ледник как источник катастрофических потоков в прошлые столетия.

Один из способов понять механизм подобных событий — их моделирование. До сих пор моделирование ледниковых катастроф недостаточно разработано, хотя на примере Геналдонской катастрофы такая работа начата [2, 3, 9]. Для Девдоракского ледника моделирование катастроф пока не проводилось. В настоящей статье представлены результаты моделирования движения сорвавшихся масс этого ледника с целью описания и оценки масштабов как прошлых, так и, возможно, будущих катастрофических завалов. Были использованы литературные источники XIX в. [1, 6, 10–13] и данные, полученные экспедицией "Казбек-2005", посвященной 180-летию исследователя казбекских завалов Б.И. Статковского [16].

Зона развития и действия катастрофического потока

Девдоракский ледник (Девдорак, Девдораки) расположен на восточном склоне «спящего» вулкана Казбек. По леднику проходит государственная граница: небольшой его участок в верхней части ледосбора относится к Российской Федерации, а остальная часть к Республике Грузия. Язык ледника в настоящее время оканчивается на высоте 2252 м (данные GPS-измерений в августе 2005 г.). Зона зарождения катастрофических потоков, произошедших в XVIII–XIX вв. (рис. 1), расположена на высотах около 2050–2200 м.

Лед и захваченные каменные обломки двигались сначала по долине р. Амилишки (рис. 2), а

после ее слияния с р. Чач (высота точки слияния по топографической карте масштаба 1:25000 составляет 1715 м) — по долине р. Кабахи. При впадении р. Кабахи в Терек (1345 м) потоки упирались в правый борт долины Терека, поворачивали на север и далее двигались по Дарьяльскому ущелью. Здесь, на участке с малыми уклонами в результате торможения и остановки потоков образовывались завалы.

История событий

Первый достоверно зафиксированный завал в результате «обрушения» Девдоракского ледника произошел в 1776 г. На протяжении последующего полувека отмечались завалы в 1778, 1785, 1808, 1817 и 1832 гг. [10]. Затем несколько раз завалы прогнозировались, но ледово-каменные массы либо не доходили до р. Терек, либо прогнозы не оправдывались. Завал 1776 г. был описан Я. Рейнегсом. Дарьяльское ущелье р. Терек было тогда перекрыто на 3 дня. Этот завал был наиболее крупным из всех зафиксированных.



Рис. 1. Зона зарождения и действия катастрофического ледово-каменного потока — язык Девдоракского ледника и верховья реки Амилишка. Окружностью обведен участок отрыва ледниковых масс, стрелкой показано направление движения. Фото О.В. Тутубалиной, 8 августа 2005 г.

Fig. 1. Origin and influence zone of catastrophic ice-debris flow: the tongue of Devdorak Glacier and upper reach of Amilishka River. Circled: rupture area of the glacier masses, the arrow shows direction of the movement. Photo by O.V. Tutubalina, 08.08.2005

ных и сопровождался значительным ущербом и жертвами среди населения. Завал 1817 г. перекрыл Терек на сутки.

Лучше других изучен завал 1832 г. Объем отложений в долине Терека, по измерениям военных топографов, составил 1,6 млн кубических сажен (около 15 млн м³). Лед перекрывал долину Терека в течение 2 лет — река текла под завальными массами. Выше завала над Терекком была устроена временная гужевая дорога.

В 1843 и 1855 гг. также отмечались подвижки Девдоракского ледника, что заставило проводить наблюдения за изменением его положения. Однако движение потока было относительно медленным, и долина Терека не перекрывалась [10]. В 1860-е годы было организовано несколько экспедиций для изучения ледника и нижележащей долины. В 1861 г. академик Г.В. Абих посетил Девдоракский ледник и сделал вывод о том, что он представляет опасность, после чего несколько комиссий изучали причины казбекских завалов. Первые две работали в 1862–1865 гг., в том числе в 1864 и 1865 гг. под руководством Б.И. Статковского. В 1876 г. вновь прогнозировалась высокая вероятность катастрофы, и ледник в 1877 г. был обследован третьей комиссией [1, 13].

Впоследствии Девдоракский ледник изучали гляциологи, в частности В.Ш. Цомая, который неоднократно высказывал идеи о потенциальной опасности новых завалов [8, 14]. Детальный исторический обзор событий на Девдоракском леднике приведен в [7].

Терминология

Слово «завал», употреблявшееся в XIX в., в настоящее время не используется для обозначения типа процесса. Кроме того, под завалом тогда пони-



Рис. 2. Штриховка, оставленная при движении катастрофических потоков. Стрелкой показано направление движения. Долина р. Амилишка. Фото О.В. Тутубалиной, 21 мая 2005 г.

Fig. 2. Striations left by catastrophic flows in the Amilishka River valley. The arrow shows direction of the movement. Photo by O.V. Tutubalina, 21.05.2005

мали как сам процесс, так и его результат — ледокаменную дамбу в долине Терека. При определении, какой из принятых современных терминов более характеризует процесс ледниковых катастроф, возникают сложности. Так, Б.И. Статковский [10] считал Казбекские завалы селями. Однако, по современным представлениям, они отличаются от «классических» селей очень высокими скоростями, а также механизмом движения. Изучение катастрофы 2002 г. на соседнем леднике Колка показало, что подобные гравитационные потоки обладают свойствами нескольких процессов. Разные исследователи применяли термины «сход ледника», «обвал ледника», «ледокаменный сель», «пульсация ледника», «ледяная лавина», «ледниковая лавина», «collapsing glacier» (рухнувший ледник), «glacier-slip triggers floods» (ледниковый оползень, вызвавший паводок), mudslide (оползень), «avalanche» (лавины), «glacier disaster» (ледниковая катастрофа), «avalanche of ice» (ледяная лавина), «rock-ice slide» (каменно-ледовый оползень) [15].

По-видимому, катастрофические гравитационные потоки имеют черты селевого, лавинного, обвального, оползневого механизмов движения, но полностью не относятся ни к одному из этих типов — их можно считать особым видом процессов. В [15] предложено называть их ледово-водно-каменными потоками Уаскаранско-Казбекского типа; при моделировании использовался термин водно-ледово-каменный поток [2, 3].

Моделирование и обсуждение результатов

Казбекские завалы представляли собой отложения ледово-каменных потоков, двигавшихся по долинам рек Амилишка и Кабахи и перекрывавших часть долины р. Терек — Дарьяльское ущелье. Отложения в основном состояли из льда. Масса льда отрывалась от Девдоракского ледника, язык которого лежал на дне долины со значительными уклонами. Вместе с тем присутствие каменных включений в завалах свидетельствует о вовлечении каменного материала по пути движения. Роль воды при движении ледокаменного потока представляется незначительной. В этой связи при моделировании движения потока использована одномерная однофазная гидравлическая модель гравитационного лавинного потока [5].

При моделировании было принято приближенное соотношение для объема льда и каменного материала: лед — 0,8, каменный материал — 0,2. Средняя плотность ледово-каменного аккумулятивного тела составила 1300 кг/м³. В модели используются три параметра: коэффициенты сухого μ и турбулентного k_t трения и коэффициент вовлечения m_e . Кроме того, задан начальный объем V_0 льда, вовлекаемого в движение. Поскольку фактические вариации значений параметров модели не известны, были приняты достаточно широкие диапазоны их изменения, используемые при моделировании лавин: $0,22 < \mu < 0,32$, $0,001 < k_t < 0,005$. Толщина слоя рыхлообломочного каменного материала считалась постоян-

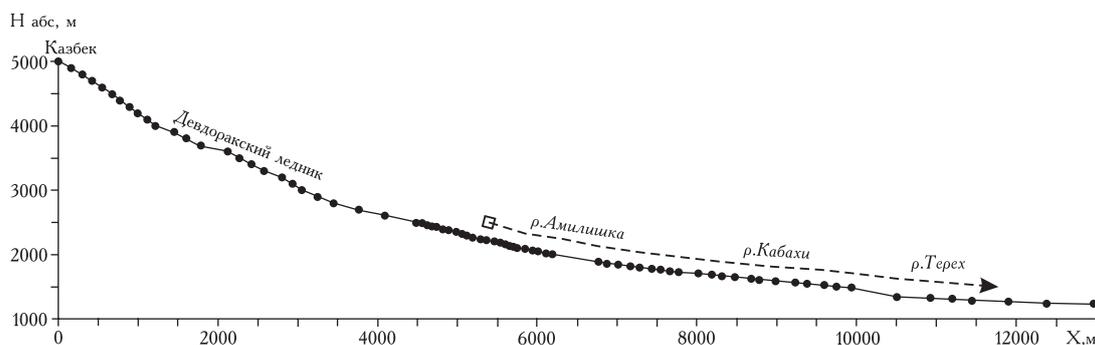


Рис. 3. Продольный профиль Девдоракского ледника и долин рек Амилишка, Кабахи и Терек (на участке завала). Стрелкой показан путь движения при катастрофах
 Fig. 3. Longitudinal profile of Devdorak Glacier and valleys of the Amilishka River, the Kabakhi River and the Terek River (in its dammed part). The dashed line shows the path of catastrophic movements

ной по длине и равной 1 м; коэффициент вовлечения m_e составил 0,0005. С учетом известной оценки объема завала 1832 г. был принят диапазон изменения начального объема V_0 льда, вовлекаемого в движение: $10,5 < V_0 < 16,5$ млн m^3 . Предполагалось, что срыв ледовой массы происходил на участке длиной 500 м при ширине ледника 300 м. Параметры площади срыва были фиксированными, а изменение объема определялось вариацией толщины ледника в диапазоне $70 < H < 110$ м. Продольный профиль пути движения был составлен по топографической карте масштаба 1:50000 (рис. 3).

Параметры модели μ , k_r , V_0 полагались случайными и нормально распределенными в заданных диапазонах изменения; средние значения и дисперсии соответствовали равномерному распределению параметров в этих диапазонах. Далее было проведено статистическое моделирование движения по модели ледово-каменной лавины. Процесс моделировался до точки остановки переднего фронта ледово-каменного тела. На выходе модели фиксировались: точка остановки S переднего фронта, максимальная высота H_{max} , длина L и погонный (на единицу ширины) объем V ледово-каменного завала. С помощью метода Монте-

Карло проведено 200 розыгрышей движения ледово-каменного потока и образования завала (табл. 1).

Полученные в результате моделирования распределения выходных параметров близки к нормальному закону, несмотря на нелинейность оператора динамической модели ледово-каменной лавины. Распределение дальности S выброса является островершинным и имеет положительную асимметрию (рис. 4). Дальность пути движения по долинам рек Амилишка, Кабахи $S \sim 11500$ м, что соответствует вероятности достижения потоком р. Терек примерно 0,08, т.е. завал должен перекрывать р. Терек примерно в одном случае из 10–12 возможных сходов, а около 90% потоков должны останавливаться в ущелье р. Кабахи, не достигая Терека.

Распределение максимальной высоты H_{max} завала почти симметрично, имеет небольшой отрицатель-

Таблица 1
 Результаты статистического моделирования*

Характеристики распределений	S	H_{max}	V	L
M	9788 м	36,5 м	15,6 m^2	2736 м
σ	1136 м	6,7 м	1,72 m^2	501 м
λ_a	1,05	0,09	-0,01	0,55
λ_e	0,96	-0,5	0,03	0,37
max	13700 м	52 м	20,8 m^2	4475 м
min	7450 м	21 м	10,7 m^2	1500 м
C_v	0,12	0,18	0,11	0,18

* M — математическое ожидание, σ — среднеквадратическое отклонение, λ_a , λ_e , C_v — соответственно коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации, max, min — максимальное и минимальное значения.

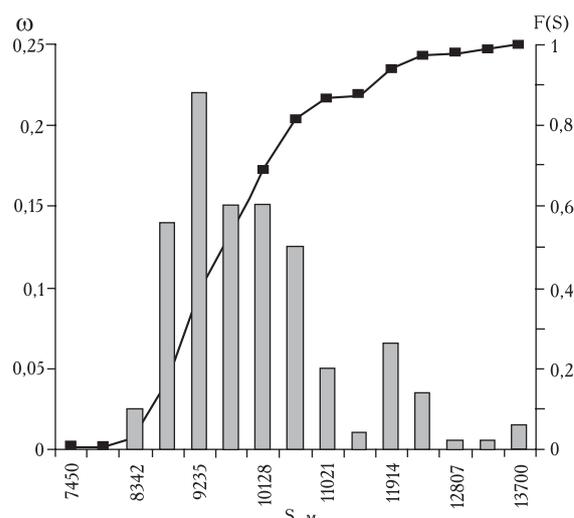


Рис. 4. Гистограмма и функция распределения точки остановки переднего фронта модельного ледово-каменного потока; ω — относительная частота. Остальные обозначения в тексте

Fig. 4. Histogram and distribution function of the stop point of leading front of the model ice-debris flow; ω — relative frequency

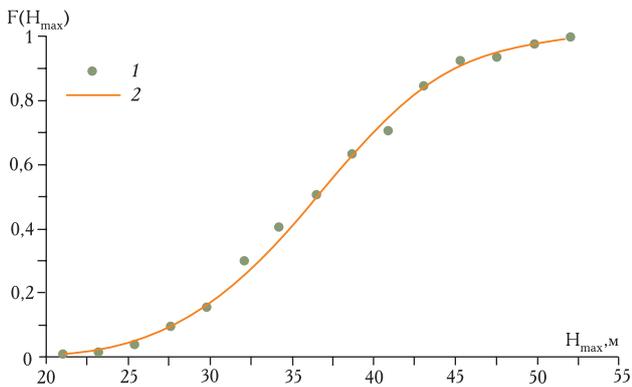


Рис. 5. Модельная (1) и нормальная (2) функции распределения максимальной высоты Казбекских завалов
 Fig. 5. Model (1) and normal (2) distribution function of the maximal thickness of ice-debris dam originated by «Kazbek events»

ный эксцесс, т.е. несколько плосковершинно по сравнению с нормальным законом распределения. Модельная и нормальная функции распределения высоты завала представлены на рис. 5. Средняя высота завала составляет 36,5 м. Типичный вид модельного завала р. Терек приведен на рис. 6. Поскольку модель одномерная, ширина завала принята равной ширине участка отрыва ледовых масс, т.е. 300 м. Здесь следует отметить, что параметры завала при моделировании соответствовали моменту остановки переднего фронта. В дальнейшем при «натекании» хвостовых масс высота модельного завала будет возрастать до 50–60 м, и максимум смещается вверх по потоку. Зафиксированная в 1832 г. максимальная высота завала была около 100 м, и этот максимум также был в «хвосте» завала. Примерно двукратное несоответствие модельного и натурного значений H_{max} может быть связано с дополнительным сопротивлением движению потока в Дарьяльском ущелье, приводящем к росту высоты завала, что не учитывается в модели. Кроме того, поток двигался при доста-

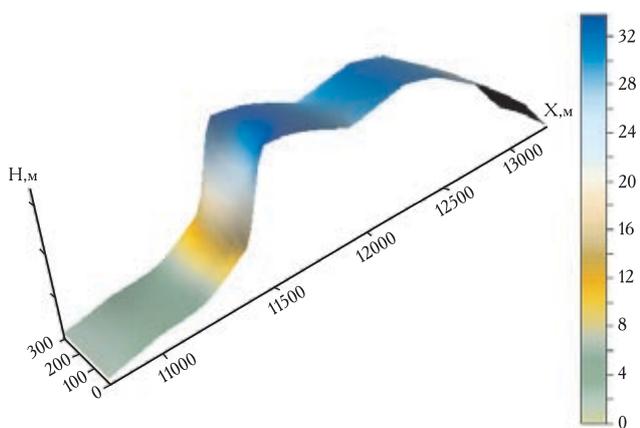


Рис. 6. Поверхность типичного казбекского завала
 Fig. 6. Model surface of a typical ice-debris dam, originated by «Kazbek events»

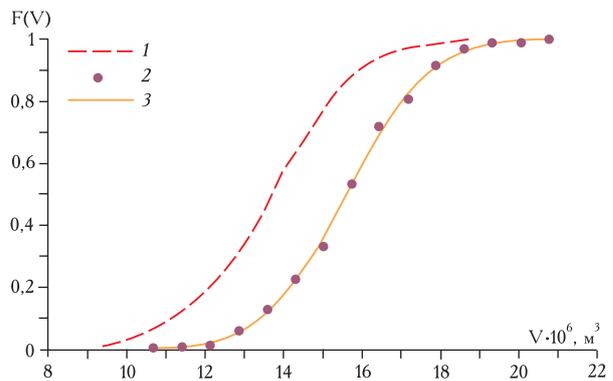


Рис. 7. Функции распределения модельного начального (1) и конечного (2 – модельное распределение, 3 – нормальное распределение) объема завалов
 Fig. 7. Distribution functions of model initial (1) and final volumes of ice-debris dams (2 – modelled, 3 – normal distribution)

точно слабом вовлечении новых масс. Поэтому модельная «лавиная» не имеет ярко выраженной головной части, которая присутствует, например, при моделировании катастрофического селевого потока [4], когда основная масса потока образуется за счет вовлечения в движение рыхлообломочного материала.

Максимальная дальность распространения отложений ледово-каменного потока $S=13700$ м соответствует наблюдаемым значениям координат переднего фронта завалов. Средняя модельная длина завалов 2700 м также близка к данным начальника Военно-Грузинской дороги Грауэрта, согласно которым в 1832 г. она составляла 1017 сажен (2166 м) [10]. На рис. 7 показаны функции распределения начального и конечного объема аккумулятивного ледового тела. Наблюдается близкое к трансляционному, т.е. без деформации, смещение функции распределения начального объема, что означает почти полное вовлечение слоя рыхлообломочного материала по пути движения лавины.

Заключение

Статистическое моделирование движения ледово-каменной массы по руслу р. Кабахи и образования завала в русле р. Терек показало возможность вероятностной оценки масштабов Девдоракских катастроф. Одномерные модели относительно просты и не позволяют учесть поперечное растекание движущейся массы. Однако, поскольку фактических данных о событиях XVIII–XIX вв. не так много, применение более сложных моделей вряд ли приведет к значительному увеличению точности оценок. Тем не менее неполное соответствие фактического (1832 г.) и модельного распределения мощности завальных отложений по длине свидетельствует о полезности калибровки параметров модели в будущем.

В настоящее время язык Девдоракского ледника вследствие деградации оледенения отступил вверх по долине. Хотя после 1832 г. ледниковых катастроф не было, нельзя утверждать, что они прекратились

навсегда. В случае гипотетического наступания, обусловленного климатическими или вулканическими причинами, на языке ледника могут создаться условия для зарождения новых казбекских завалов. Неспokoйный характер Девдоракского ледника в прошлом дает основания предполагать, что теоретическая вероятность возобновления завалов в будущем существует.

В случае зарождения катастрофического потока Девдоракский ледник, большая часть которого находится в Грузии, потенциально угрожает и российской территории. В зоне возможного риска находятся газопровод Моздок–Тбилиси, Военно-Грузинская дорога, строения, а при экстремальном развитии событий — мосты через Терек, плотина деривационной ГЭС, грузинские и российские пограничные и таможенные посты. Около пограничных и таможенных постов часто скапливаются сотни граждан и десятки автомобилей. Ниже по р. Терек находится столица Северной Осетии — Владикавказ. Поэтому моделирование казбекских завалов — не только научная, но и практическая задача, и призвано в будущем помочь оценивать риск для людей и инфраструктуры на прилегающих территориях.

Авторы выражают благодарность Э.В. Запороженко, Д.С. Мосиной, Д.А. Петракову, А.М. Тарбеевой, О.В. Тутубалиной за участие в сборе и обработке полевых данных, И.В. Галушкину за предоставление материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 05-05-64037 и 06-05-64787.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абиx Г.В. Несколько слов о состоянии в настоящее время Девдоракского ледника. — Изв. Кавказского отдела Русского геогр. об-ва, т. V, 1877, с. 57–64.
2. Божинский А.Н. Математическое моделирование крупномасштабных селевых и гляциальных катастроф. — МГИ, вып. 99, 2005, с. 13–18.
3. Божинский А.Н. Статистическое моделирование гравитационных лавинных потоков. — МГИ, вып. 100, 2006, с. 83–90.
4. Божинский А.Н., Виноградова Н.Н., Крыленко И.В. Математическая модель катастрофического селевого потока в 2000 г. в г. Тырныаузе. — Вестн. МГУ, Сер. 5, География, 2004, № 5, с. 22–27.
5. Божинский А.Н., Назаров А.Н., Черноус П.А. Вероятностная модель движения снежных лавин. — Вестн. МГУ, Сер. 5, География, 2000, № 5, с. 8–12.
6. Висковатов А.А. О периодическом Казбекском завале. — Изв. Кавказского отдела Русского геогр. об-ва, вып. 6, 1864, с. 12–29.
7. Запороженко Э.В., Черноморец С.С. История и изученность Казбекских завалов. — Вестн. Кавказского горного общества, Пятигорск, № 5, 2004, с. 33–54, 159.
8. Котляков В.М., Лапина И.Я. Рабочее совещание и школа-семинар секции гляциологии в апреле 1977 г. — МГИ, вып. 30, 1977, с. 13–35.
9. Никитин М.Ю., Хуггель К., Шварц М. и др. Дешифрирование дистанционных материалов для реконструкции процесса обрушения ледника Колка. — 2003, http://www.info-terra.ru/kolka_ru.php
10. Статковский Б. О причинах происхождения Казбекского завала и о мерах для его предупреждения. Тифлис, 1877, 42 с.
11. Статковский Б. Задачи климатологии Кавказа. СПб., Рус. Скоропечатня (П.С. Нахимова), 1878, 285 с.
12. Стебницкий И.И. О распределении ледников на Кавказе. — Изв. Кавказского отдела Русского геогр. об-ва, т. V, № 1, 1877, с. 1–21.
13. Хатисян Г.С. Казбекские ледники в период с 1862 по 1887 г. — Изв. Русского геогр. об-ва, т. XXIV, вып. 5, 1888 (1889), с. 326–347.
14. Цомае В.Ш., Алиев И.А. Массообмен ледников Кавказа. — МГИ, вып. 66, 1989, с. 66–69.
15. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М., «Научный мир», 2005, 184 с.
16. Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Петраков Д.А. Ледники г. Казбек как источник природной опасности: оценка риска. — Оценка и управление природными рисками: Материалы Всероссийской конференции «РИСК — 2006». М., 2006, с. 226–228.

SUMMARY

The focus of this study is modelling of «Kazbek glacial events» in 18–19th centuries that resulted in blockages of the Terek River valley by masses detached from the tongue of Devdorak glacier. A gravitational ice-debris flow was modelled with using one-dimensional one-phase hydraulic model. The initial volume of glacier masses and the model parameters were considered as random within rather wide ranges. Using the Monte-Carlo method the 200 generations of motion of an ice-debris flow up to a stop point of a leading front were made. Histograms and distribution functions of output model parameters, namely, a stop point of leading front, maximal height, length and volume (per unit of width) of an ice-debris dam are constructed. A satisfactory agreement between the model and field data of 1832 was reached. Modelling of the ice-debris flow motion and blockage formation in a channel in the Terek river channel has revealed an opportunity of a probabilistic estimation of Kazbek glacial disaster scales.